

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Studijní program **M 2301** Strojní inženýrství

Studijní obor **2303T002** Strojírenská technologie

Zaměření

Strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie

**POSOUZENÍ PLYNATOSTI VYBRANÝCH FORMOVACÍCH A
JÁDROVÝCH SMĚSÍ**

**EXAMINATION OF GASSINESS OF THE SELECTED SANDS AND
CORES MIXTURES**

David KOČÍ

KSP – SM – 537

Vedoucí práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant: Ing. Jiří Machuta

Vedoucí katedry: Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 66

Počet tabulek: 13

Počet obrázků: 30

Počet příloh: 2

23.5. 2008

ANOTACE
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

**Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program M 2301 Strojní inženýrství

Diplomant: David KOČÍ

Téma práce: Posouzení plynatosti vybraných formovacích a
 jádrových směsí

Examination of gassiness of the selected sands and
cores mixtures

Číslo DP: KSP – SM – 537

Vedoucí DP: Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci

Konzultant DP: Ing. Jiří Machuta, – TU v Liberci

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá sledováním a měřením plynatosti slévárenských, formovacích směsí. Práce se skládá z teoretické a experimentální části. Teoretická část popisuje charakteristiku slévárenských směsí a problematiku vzniku plynů z formovací směsi a jeho pronikání do taveniny kovu. Experimentální část obsahuje informace o kalibraci měřícího zařízení a měření samotných vzorků formovacích směsí.

Abstract: This diploma thesis deals with following and measuring of flatulence of moulding foundry mixes. The work is composed by theory and experimental parts. The theory part describes profile of foundry's

mixes and problems of gas rise from moulding mix. The experimental part contains informatons and description about calibration of measuring equipment and description of measuring unaccompanied patterns of moulding mixes.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 23. května 2008

.....
David KOČÍ
Gagarinova 772
460 07 Liberec

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat, řadě lidí. Zejména vedoucí mé diplomové práce, kterou byla paní prof. Ing. Iva Nová, CSc. a konzultantům Ing. Jiřímu Machutovi; Ing. Martinovi Seidlovi a Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za pomoc, věnovaný čas a velmi cenné rady, díky nimž bylo možné tuto práci vytvořit. Dále panu Drahoslavu Vinšovi za pomoc při pracích prováděných v dílenských prostorách. Mé poděkování také patří všem lidem, kteří mi byli při tvorbě této diplomové práce psychickou a duševní oporou.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část práce	10
2.1 Charakteristika formovacích směsí.....	10
2.1.1 Ostřiva	11
2.1.2 Pojiva.....	15
2.1.3 Přísady.....	25
2.1.4 Voda	26
2.2 Mechanismus vzniku plynů v pískových formách	26
2.2.1 Plynotvornost formovacích směsí.....	29
2.2.2 Způsob vzniku plynů.....	30
2.2.3 Popis vzniku plynu z formy a jeho pronikání do taveniny.....	32
2.3 Metody sledování plynatosti.....	32
2.3.1 Metody provozní (přímé)	33
2.3.2 Metody laboratorní (nepřímé)	35
3. Experimentální část práce	37
3.1 Charakteristika měřicího zařízení	37
3.1.1 Kalibrace zařízení	39
3.2 Popis přípravy vzorků a sledování plynatosti.....	43
3.3 Vyhodnocení záznamů získaných při měření.....	47
4. Diskuse výsledků	63
5. Závěr.....	65
6. Použitá literatura	66

Seznam použitých zkratk a symbolů

P_f	přetlak plynů ve formě	[Pa]
P_m	metalostatický tlak	[Pa]
P_p	odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny	[Pa]
P_{pf}	přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu	[Pa]
V_m	molový objem plynu	[m ³ · kmol ⁻¹]
m	hmotnost	[kg]
M_{CaCO_3}	molární hmotnost CaCO ₃	[kg · kmol ⁻¹]
V	objem uvolněných plynů	[cm ³]
p	tlak	[Pa]
v	měrný objem	[m ³ · kg ⁻¹]
r	měrná plynová konstanta	[J · kg ⁻¹ K ⁻¹]
T	teplota	[K]
V_0	objem měřicí soustavy	[m ³]
ΔV	změna objemu	[m ³]
Δp	změna tlaku	[Pa]
P_a	atmosferický tlak	[Pa]
K_F	koeficient prohřátí formy	[m · s ^{1/2}]
H_F	hloubka prohřátí formy	[m]
t	doba ohřevu	[s]

1. ÚVOD

Celosvětový průmysl se bez slévárenství neobejde. Jde o jedno z nejdůležitějších odvětví, v kterém nezůstává v pozadí ani Česká republika. Vedle hutních odlitků se výrazně projevuje prudký nárůst odlitků pro automobilový průmysl. Odlitky vzniklé v České republice znamenají důležitou složku automobilového průmyslu nejen u nás, ale i v zahraničí. Což znamená, že se české slévárenství stává jednou z velmi důležitých součástí našeho hospodářství. Největší zastoupení má výroba odlitků ze slitin železa (litina s kuličkovým a lupínkovým grafitem, ocel na odlitky atd.). V poslední době vzrostl objem výroby odlitků z neželezných lehkých kovů (Al, Cu, Zn, atd.), které splňují požadavky na kvalitu odlitku dané zákazníkem. Z tohoto důvodu je kladen důraz na zvyšování efektivnosti výroby a produktivity práce, přičemž je nutné brát ohled na životní prostředí.

Aby bylo možné dosáhnout těchto cílů a splnění stále se zpřísnujících ekologických limitů, je nutné vyvíjet nové a nové formovací a jádrové směsi. V současnosti, se stále ve větší míře využívají směsi, jejichž pojivový systém je postaven na organickém základě, který vytlačuje anorganické složky. Tímto přechodem z anorganických na organická pojiva vyvstává problém týkající se uvolňování plynů, které se uvolňují při spalování organických pojiv. Je tedy nutné stále více zdokonalovat zařízení a metody sloužící k vyhodnocování plynatosti formovacích a jádrových směsí. Sledování plynatosti je věnována velká pozornost. Jelikož vzniklé plyny mohou prostoupit do taveniny a tím způsobit vady odlitku. Vzniklo již několik metod a zařízení na sledování plynatosti formovacích a jádrových směsí.

Touto problematikou se již v minulých letech začala zabývat také katedra strojírenské technologie TU v Liberci. Zařízení, která zde vznikla, se stále zdokonalovala a vždy se bral zřetel, aby množství uvolňujících se plynů bylo zobrazováno a zaznamenáváno v závislosti na čase.

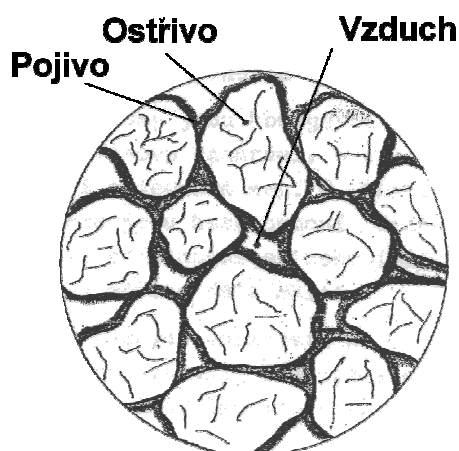
Také problematikou sledování plynatosti, různých formovacích směsí se zabývá tato diplomová práce.

Tato diplomová práce vznikla s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Charakteristika formovacích směsí

K výrobě netrvalých pískových forem se používají formovací směsi skládající se ze dvou základních složek. Těmito složkami jsou ostřivo a pojivo. Vedle ostřiva a pojiva formovací směsi obsahují různé přísady a určité množství vody. Schematické znázornění formovací směsi je na obr. 2-1.



Obr. 2-1 Schéma formovací směsi [2]

Ostřivo je žáruvzdorný materiál tvořící až 98% obsahu formovací směsi. Částice ostřiva mají různý tvar (jsou kulatá i ostrohranná) a jejich velikost je větší než 0,02 mm. Nejpoužívanějším ostřivem je ostřivo křemenné (jehož podstatou je SiO_2 což je křemenný písek, jehož tavní teplota je 1700°C). Dále se používá šamot při výrobě těžkých ocelových odlitků a korund, který se vyznačuje vysokou žáruvzdorností.

Pojivo je látka nebo směs látek organického typu (pryskyřice, tuky) nebo anorganického typu (jíly, vodní sklo) dávající formovací směsi následující vlastnosti – vaznost (pevnost směsi v syrovém stavu), pevnost po vysušení nebo vytvrzení chemickou cestou, pevnost za vysokých teplot (poddajnost a odpor forem a jader při smršťování odlitku), pevnost po odlití určující rozpadavost tak zvanou zbytkovou pevnost.

Přísady jsou látky, které zlepšují vlastnosti slévárenské formy (zvyšují prodyšnost, rozpadavost). Nejčastější přísadou je kamenouhelná moučka, jež slouží

jako ochrana proti vzniku zapečenin, dále se používají dřevěné piliny, po jejichž vyhoření se vytvoří kanálky, které zvyšují prodyšnost a přispívají k dilataci formy.

Voda dává formovací směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování. Její obsah ve formovací směsi bývá kolem 3 až 4% hmotnosti.

Formovací směs může být:

Modelová – je připravována z nových surovin, při přechování se obkládá model a při odlévání přichází do styku s tekutým kovem.

Výplňová (vratná) – jedná se o výplň zbývajících objemu formovacího rámu (při formování do země) nebo vnitřní část jádra, připravovaná z vratné, již použité modelové směsi.

Jádrová – tvoří celý objem nebo jen lící část (pracovní povrch) jádra. Připravuje se zpravidla z nových surovin. Po stránce jakosti jsou na ni kladeny vyšší nároky, nežli u směsi modelové (vyšší odolnost vůči penetraci kovu, dobrá rozpadavost po odlití, delší skladovatelnost jader a podobně).

Jednotná – používá se při technologii jednotných bentonitových směsí, strojní výrobě forem, kde celý objem formovacího rámu tvoří jediná směs (není dvojvrstvá forma). Je to už jednou nebo vícekrát použitá směs po úpravě v každém oběhovém cyklu (vychlazení, ovlhčení, oživení) [1].

2.1.1 Ostřiva

Ostřivo má hlavní objemové hmotností zastoupení ve formovací směsi. Tvoří až 98% formovací směsi. Jde o zrnitý žáruvzdorný materiál s velikostí částic nad 0,02 mm. Tvoří materiálový skelet forem a jader, a proto vedle aktivity povrchu zrn patří k jeho nejdůležitějším vlastnostem hranatost a granulometrie částic. Obě poslední charakteristiky rozhodují o objemové hmotnosti, pórovitosti a tedy i prodyšnosti a propustnosti směsi, tepelné dilatace a vzniku napětí z brzděné dilatace, tepelné vodivosti směsi a dokonce do značné míry ovlivňují i pevnost forem a jader.

Za kritickou velikost částic ostřiva považujeme 0,02 mm. Menší částice řadíme do vyplavitelného podílu – jíly, křemenný prach, neplastické částice, živec, jiné minerály (stanovíme plavící zkouškou) [1].

Ostřiva, která se používají k výrobě formovacích a jádrových směsí se hodnotí dle tří nejdůležitějších vlastností (tvar a povrch zrn – ostrohranné, zaoblené;

zrnitost – rozsah velikosti zrn ve směsi; chemická podstata – kyselé, neutrální, zásadité).

Dělení ostřiv dle chemické podstaty:

a) Kyselé podstata

Křemenná ostřiva – základní surovinou formovacích hmot je oxid křemičitý SiO_2 . Je nejrozsáhlejším minerálem v přírodě a nachází se ve vhodném zrnění. Jeho teplota tavení je nad 1700°C , takže je vhodný pro výrobu forem k odlévání většiny slévarenských slitin.

Vedle těchto příznivých vlastností má SiO_2 i vlastnost méně vhodné. Při ohřevu prodělává polymorfní přeměny, které se projevují objemovými změnami a poruchami celistvosti formy. Křemen je vysloveně kyselé sloučenina reagující se zásaditými látkami. Tyto reakce snižují žáruvzdornost formovací směsi. Další nepříznivou vlastností je křemenný prach, který způsobuje silikózu, což je velmi vážné onemocnění.

Oxid křemičitý existuje v několika krystalických modifikacích a to křemen α a β , cristobalit α a β , tridymit α , β a γ a křemenné sklo. Základním a nejrozšířenějším typem křemene v přírodě je β -křemen. Má podobu křemenných písků, křemenců, různých druhů křišťálů, pískovců atd.

Křemenné písky jsou doprovázeny průvodními minerály, které mohou mít škodlivý vliv na jakost odlitků. Jde především o živec, slídu, uhličitany, způsobující spékavost směsi a tím zhoršení kvality povrchu odlitku.

Povrch křemenných písků netříděných a chemicky neupravovaných bývá ve většině případů povlečen hydratovaným křemenem nebo hydroxidem železitým, hlinitým nebo přírodními jíly. Tato vrstva má jen molekulární tloušťku, přesto má dosti značný vliv na přilnavost pojiv jak jílových, tak i organických [3].

b) Zásaditá podstata

Magnesitová ostřiva – jde vysloveně o zásadité ostřivo. Vyrábí se z horniny zvané magnezit, která obsahuje vedle čistého minerálu ještě vápenaté, křemičité a železité sloučeniny. Čistý magnesit je uhličitán hořečnatý MgCO_3 mající hnědou až bělošedou barvu. Jeho vznik je dán působením roztoků obsahujících kyselý uhličitán hořečnatý na vápenec a

dolomity. Magnesitové ostřivo je určeno především při výrobě těžkých odlitků z manganových ocelí, které obsahují vysoký podíl MnO, jenž by chemicky reagoval s ostřivý kyselého charakteru SiO₂ [3].

Chrommagnesitová ostřiva – jde o směs slinutého magnesitu zvlášť chudého na CaO a kvalitní chromové rudy. Chromová ruda obsahuje více než 80% minerálu zvaného chromit (59% Cr₂O₃ s příměsemi MgO, Al₂O₃ a FeO). Ve formovacích směsích se používá jako velmi kvalitní ostřivo, pro speciální, legované oceli [3].

c) Neutrální podstata

Šamotové ostřivo – je označováno jako vypálený žáruvzdorný jíl, obsahující nejméně 30% Al₂O₃. Další složkou této žáruvzdorné hmoty je SiO₂. Všechny ostatní kysličníky jsou znečišťujícími příměsemi, jejichž množství a složení je závislé na čistotě výchozí suroviny. Žáruvzdornost závisí především na obsahu kysličníku hlinitého. Dle žáruvzdornosti rozdělujeme šamot na nízkožáruvzdorný, středněžáruvzdorný, vysokožáruvzdorný. Dle poměru SiO₂ a Al₂O₃ šamoty dělíme na kyselé, normální a hlinité. V kombinaci se žáruvzdorným jílem jako pojivem je šamotové ostřivo vhodné pro výrobu forem těžkých ocelových odlitků nebo těžkých odlitků ze šedé litiny. Do formovacích směsí volíme šamot středně žáruvzdorný normální ($\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 2$), hutný, drcený na zrno max. průměru 3 až 5 mm. Rozdělení zrnitosti se dělí tak, aby součtová křivka obsahovala částice všech velikostí. Šamotové ostřivo neprodělává při ohřevu tekutým kovem polymorfni přeměny, formovací směs není náchylná k tvorbě zálpů [3].

Ostřiva s vysokým obsahem Al₂O₃ – při obsahu 62,9% Al₂O₃ (Al₂O₃ . SiO₂) vzniká silimanit (bezvodý křemičitan hlinitý, který přechází v mullit s teoretickým obsahem 71,8% Al₂O₃ (3Al₂O₃ . SiO₂). Silimanit se dováží z Indie nebo se vyrábí uměle. Umělý silimanit vzniká pálením plaveného kaolínu, ke kterému se přidává umělý Al₂O₃. Rozpadem silimanitu při vysokých teplotách vzniká mullit. Vyrábí se uměle podobně jako silimanit,

vazba se však více obohacuje kyslíčnickem hlinitým. Silimanitové a především mullitové ostřívo se vyznačuje vysokou žáruvzdorností (nad 38 ž), odolností proti náhlým změnám teploty a velkou chemickou stálostí. Jejich použití je především ve formovacích směsích pro metody přesného lití [3].

Korundové ostřívo – v přírodě se nachází vzácně je to čistý Al_2O_3 modrý minerál zvaný safír. Krystalizuje v soustavě trigonální a v kyselinách se nerozpouští. Průmyslově se vyrábí uměle tavením bauxitu nebo čistých jílu bohatých na Al_2O_3 . Korundové ostřívo se vyznačuje vysokou únosností v žáru, odolností proti náhlým změnám teploty, chemickou odolností a objemovou stálostí. Korund je velmi drahý, což brání jeho využití ve formovacích směsích. Vhodný je však jako plnivo do barviva pro těžké ocelové odlitky a namáhaná jádra [3].

Spinelová ostřiva – jedná se o hlinitan hořečnatý $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Minerály spinelové řady se užívají jako součásti jiných žáruvzdorných hmot, které po rozemletí mohou sloužit jako ostřívo formovacích směsí pro těžké odlitky nebo pro nátěry forem. Při vysoké žáruvzdornosti mají nízkou spékavost (kolem 1450°C), při styku s tekutým kovem vytvářejí kůru na povrchu formy a zabraňují penetraci.

Forsteritová ostřiva – jde o minerál s chemickým složením Mg_2SiO_4 , vyrábí se pálením mastkových nebo hadcových břidlic a jiných hořečnatých křemičitanů, jako olivínu, serpentinu aj. Forsterit má vysokou žáruvzdornost, vysokou odolnost proti struskám a lepší stálost při změnách teploty než magnezit.

Olivínová ostřiva – jedná se o přechodovou formu křemičitanu hořečnatého a při pálení přechází minerál forsterit. Pro svou vysokou žáruvzdornost je přírodní olivín používán ve formovacích směsích [3].

Zirkonová ostřiva – jedná se o minerál $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ krystalizující ve čtverečné soustavě. Má hnědočervenou barvu a tvrdost 7,5. Běžně obsahuje

stopy hafnia, thoria nebo uranu. Jeho teplota tavení je při 2550°C. Jde o velmi stálý minerál s dobrou odolností proti deformaci v žáru a proti působení zásaditých i kyselých tavenin. Zirkonové ostřívo je velmi drahé vzhledem k ceně surovin, jejichž ložiska se nacházejí v zámoří. Používá se pro nejvíce namáhaná jádra nebo nátěry forem ze slitinových ocelí [3].

d) Speciální a umělá ostřiva

Grafitová a uhlíková ostřiva – grafit je používán pro svůj nízký koeficient tepelné roztažnosti, má vysokou korozní a chemickou stálost, vysokou tepelnou vodivost (3x větší než u křemenných písků), malé opotřebení kovem a struskou. Formy při lití je nutno chránit před stykem se vzduchem nad teplotou oxidačního bodu, který je 451°C, jinak dochází k vyhořívání grafitu. Odlitky z grafitových ostřiv jsou velmi přesné s čistým a hladkým povrchem [3].

Kovová ostřiva – dopomáhají ke zvyšování tepelné vodivosti forem. Tato ostřiva jsou většinou získávána tříděním z odpadů slévarenských tryskačů nebo se používají přímo tryskáci ocelové nebo litinové broky. Výhodou kovového ostřiva je snadná regenerace s poměrně konstantními vlastnostmi. Kovové ostřívo můžeme v magnetickém poli zmagnetizovat a vytvořit tak dutinu formy podle nemagnetického modelu. Po odlití a ztuhnutí odlitku se magnetické pole zruší a forma z takového ostřiva se rozpadne. Kovová ostřiva mají vysokou smáčivost taveninou, povrch forem je nutno opatřit dokonalým nátěrem [3].

2.1.2 Pojiva

Pojiva ve formovacích směsích vytvářejí vazbu mezi jednotlivými zrny pískového systému. Tato vazba může působit již v syrovém stavu po rozmíchání pojiva s ostřivem nebo teprve po fyzikálním či chemickém zásahu z vnějšího prostředí.

Vazba pojiva s ostřivem je určována velikostí adhezních sil mezi jejich povrchy a velikostí sil kohezních, určených vnitřní pevností daného typu pojiva.

Charakter těchto sil je dán stavem povrchu a granulometrickou skladbou ostřiva a fyzikálně-chemickými vlastnostmi různých druhů pojiv.

Nejběžnější rozdělení slévarenských pojiv je podle jejich původu, a to na anorganická a organická pojiva.

Anorganická pojiva jsou minerálního původu a udělují formovací směsi vaznost již v syrovém stavu nebo vytvrzují po chemickém nebo fyzikálním zpevnění. Patří mezi ně především jíly, cement, sádra, vodní sklo atd. Tato pojiva mají některé společné vlastnosti: jsou vhodné pro lití za syrova, nejsou citlivá na teplotu sušení, vyvíjejí málo plynů při lití, po odlití mají však zhoršenou rozpadavost, po rozpadu formovací směsi teplem tekutého kovu nevyhořívají.

Organická pojiva tvoří velkou oblast formovacích materiálů. Patří mezi ně především umělé pryskyřice, oleje, sacharidy, bitumeny a jiné odpadní produkty [3].

Podle novějšího dělení jsou pojiva rozdělena do 3. generací a to následovně:

Pojiva 1. generace – jedná se o pojiva anorganická a jsou to pojiva jílová.

Používají se při formování na syrovo i na sušení, jsou nositelem vaznosti i pevnosti po vysušení směsí syntetických i přirozených. Jílové minerály se rozděluje podle složení chemického, krystalografického, geologického aj. Podle struktury patří mezi silikáty vrstvené, které jsou složeny z vrstviček čtyřstěnnů $(\text{SiO}_4)^{4-}$ a osmistěnnů $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ nebo $\text{Mg}(\text{OH})_6^{4-}$.

Vznik jílových pojiv umožnila primární magnetická krystalizace zemské kůry, při níž docházelo k hydrotermálním procesům, kdy hydrotermální roztoky pronikly horninami a reagovali s nimi. Z těchto roztoků krystalizovaly minerály jako kaolinit, montmorillonit, jílové slídy a jiné. Magnetické materiály se v procesu větrání rozpadaly a jejich složky se dostávaly do koloidních nebo pravých roztoků, a za nových podmínek vznikly nové stabilní jílové minerály. Například kaolinitické jíly vznikly rozkladem živců v kyselém prostředí, montmorillonit větráním tufů a společného popela v zásaditém prostředí. Vlivem postupných přeměn a druhotného přemísťování obsahuje jílovina vedle čistých jílových nerostů zbytky po zvětrávání (jemně rozptýlený křemen, živec a slídu), biogenní příměsi (uhličitán vápenatý ze skořápek mikroorganismů, organické součásti

z rostlin), nekřemičitany (limonit, hydrargylit a jiné) a novotvary vzniklé po usazení jíloviny (pyrit, dolomit a jiné) [3].

Nejdůležitější složkou stavby vrstvených silikátů je voda, která je v jílech obsažena v několika formách:

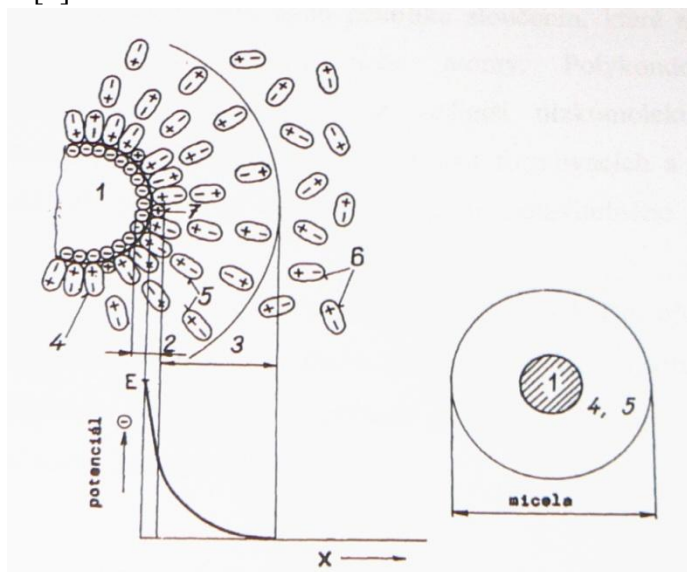
- I. voda vázaná ve formě molekul H_2O ,
- II. voda vázaná ve formě OH skupin,
- III. voda volná, je vázána fyzikálně třemi rozdílnými způsoby:
 - voda vázaná na povrchu částic,
 - voda vázaná v mezivrstvovém prostoru mimo hydratační obaly vyměnitelných kationtů,
 - voda vázaná v koordinačních sférách vyměnitelných kationtů [3].

Ve slévárenské praxi rozlišujeme tři druhy jílu:

- a) *Kaolinitické jíly* – kaolinit ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) je hlavní součástí horniny kaolinu a žáruvzdorných jílu. Plavením surového kaolinu se získává plavený kaolin, který obsahuje až 90% kaolinitu a zbytek jsou příměsi křemene, živce, slídy aj. Kaolinitu příbuzné jsou minerály nacrit, dickit a halloysit. Surový kaolin je pro formovací materiály vhodný, má vysokou teplotu spékání, takže dochází k rozplavování povrchu formy. Pro přípravu syntetických směsí na sušení pro těžké odlitky ze šedé litiny a oceli je používán žáruvzdorný směsný jíl s obchodním označením Tumerit K, který se vyznačuje zvýšenou schopností pevnosti po sušení (nad 1MPa). Ve slévárnách se však kaolinitických jílu používá ve značné míře jako pojiva při přípravě dusacích hmot pro opravu kuploven nebo licích pánví. Kaolinitické jíly se vyznačují poměrně vysokou žáruvzdorností a malou bobtnavostí [3].
- b) *Illitické jíly* – jedná se o slídkové jíly, které jsou obsaženy ve většině přirozených formovacích písků. Nejhlavnějším z illitických jílu je glaukonit, který je tvořen drobnými zrnky zelené barvy. Podle barvy i složení je to železnato-železitý jíl s 20 – 25% oxidů železa. Po dokonalém rozetření je velmi plastický a formovací směsí s ním dosahují vysokých vazností. Spékavost má kolem $1300^{\circ}C$, takže vytváří na lici formy tenkou

spečenou vrstvičku formovacího materiálu, která se nerozplavuje a snadno se odlupuje z odlitků. Glaukonit je hlavní součástí jílové zeminy slévárenského přirozeného písku Rájec, který jej obsahuje v množství 12 až 15%. Někdy je v illitickém jílu přítomen minerál limonit, který jej zabarvuje do hněda. Illitické jíly mají středně velkou žárupevnost a bobtnavost [3].

- c) *Montmorillonitické jíly* – montmorillonit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), jehož hlavní naleziště se nachází ve Francii, je hlavním minerálem horniny zvané bentonit. Jeho název je odvozen z názvu jeho naleziště Fort Benton v USA. Bentonit vznikl zvětráním sopečných hornin jako čediče, diabasů a hlavně jejich popela, tj. tufů, přičemž proces bentonitizace probíhala především v zásaditém prostředí na rozdíl od kaolinu, jehož metamorfóza předpokládá kyselé prostředí. Od kaolinu se bentonit liší tím, že je různobarevný (žlutý, šedý, červený), na omak je mastný. Pro svou dobrou plastičnost, absorpční schopnosti je využíván v chemickém průmyslu, při těžbě ropy, v zemědělství a především ve slévárenství. Vysoká vaznost bentonitových jílu ve formovacích směsích umožňuje snížit jejich obsah až třikrát oproti jílům jiných druhů. Malý obsah jílu znamená však také nízký obsah vody ve formovací směsi, což umožňuje odlévání do forem na syrovo [3].



1 – jádro micely (částice jílu); 2 – elektrická dvojitá vrstva; 3 – difúzní vrstva; 4 – pevně vázaná voda (dipóly vody); 5 – dipóly slabě vázané vody; 6 – volná voda; 7 – sodík (adsorbované kationty).

Obr. 2-2 Schéma pojivového systému jíl – voda [2].

Pojiva 2. generace – tato pojiva jsou založena na chemické podstatě pojení, buď za tepla, nebo za studena.

- *Pryskyřičná pojiva* – Jsou určena pro výrobu jader a forem. Jsou velmi plynotvorné, avšak podporují dobrou rozpadavost směsi. Dnes se ve slévárenství uplatňuje celá řada pryskyřic, především ty, které nemají karcinogenní účinky. Z tohoto důvodu se již nepoužívají pryskyřice fenolformaldehydové. Dnes se používají pryskyřice furanové, polyuretanové, alkydové, novolakové, resolové.

Na pryskyřičná pojiva do formovacích a jádrových směsí klademe následující požadavky:

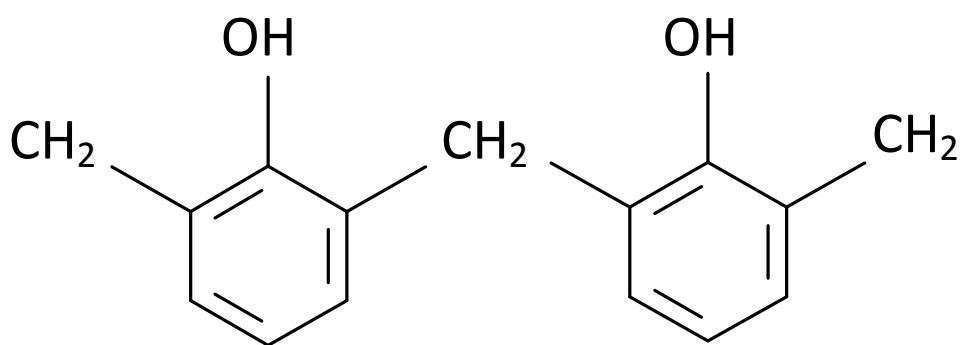
- Dostatečně velká tekutost směsí.
- Vysoká rychlost vytvrzování (polymerace).
- Absolutní tuhost jader při vyjímání jader z horkého jaderníku.
- Slabá reaktivnost pojiva ve styku s roztaveným kovem.
- Nízká plynnatost pojiva.
- Minimální navlhavost vyrobených jader.
- Dobrá rozpadavost jader po odlití.
- Zdravotní nezávadnost.
- Větší ekonomická výhodnost pojiva

Vytvrzování pryskyřičných pojiv, ať za studena či za tepla probíhá mnohem rychleji než u dříve používaných olejů. Všechna pojiva na podkladě umělých pryskyřic mají toxické účinky na lidský organismus. Je to vývin volného fenolu, formaldehydu nebo furanu během přípravy a vytvrzování směsí. Při vytvrzování slévárenských syntetických pryskyřic dochází k polykondenzaci. Při níž vznikají makromolekuly postupně jako mezi produkty. Během reakce neustále vzrůstá molekulová hodnota jednotlivých makromolekul na úkor molekul malých.

Při polykondenzaci není možno dosáhnout tak vysokého polymeračního stupně jako při polymeraci. Dosažení vysokého polymeračního stupně závisí na tom, do jaké míry se podaří odstranit ze směsi nízkomolekulární zplodiny reakce. Přítomnost vody zabraňuje vzniku produktu s vysokým polymeračním stupněm. Při

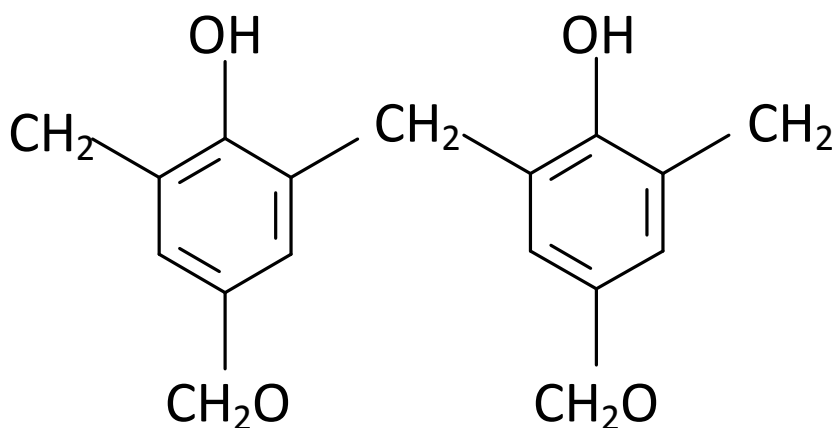
těchto dějích má velký význam teplota reagující směsi, ta určuje jak rychlost vytvrzování, tak snížení zplodin reakce (voda) a tím i dosažení polymeračního stupně [3].

a) *Fenolformaldehydové pryskyřice* – tyto pryskyřice, nazývané též fenoplasy, vyrábíme polykondenzací fenolů s formaldehydem. Adicí formaldehydu na fenol v poloze orto nebo para vznikají fenol-alkoholy schopné další polykondenzační reakce. V kyselém prostředí s přebytkem fenolů se vytvářejí lineární řetězce makromolekul teplem netvrditelných pryskyřic (novolaků).



Obr. 2-3 Schéma strukturního vzorce teplem netvrditelných pryskyřic – novolaků [3].

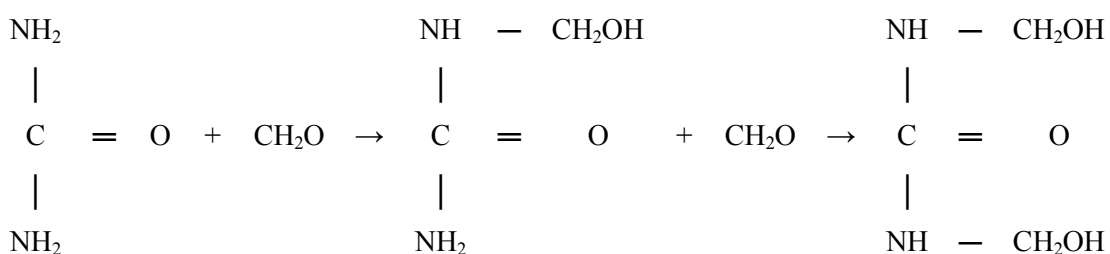
Fenolová jádra jsou navzájem spojena metylenovými skupinami CH_2 . Reakcí v alkalickém prostředí s přebytkem formaldehydu získáme rozvětvené makromolekuly, jejichž fenolová jádra obsahují volné metylenové skupiny, podmiňující tvrditelnost pryskyřice (rezolů).



Obr. 2-4 Schéma strukturního vzorce teplem vytvrditelných pryskyřic – rezolů [3].

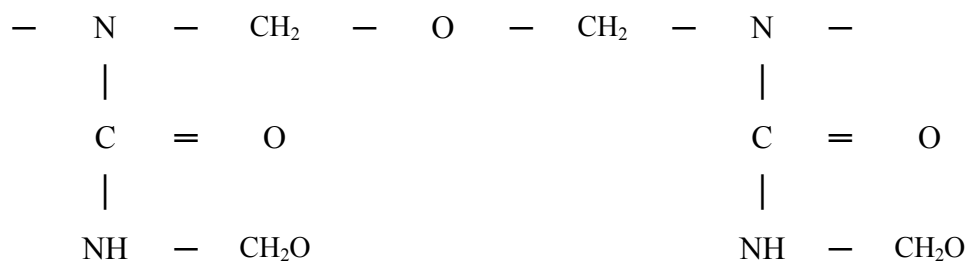
Podle způsobu použití ve slévárenských směsích se fenolformaldehydová pryskyřice dělí na fenolformaldehydové nebo kresolformaldehydové roztoky a práškové fenolformaldehydové tmely – novolaky [3].

b) *Močovinoformaldehydové pryskyřice* – vznikají polykondenzací 1 molekuly močoviny ve slabě kyselém prostředí. V první fázi reakce vzniká přechodně nejprve monodimetylmočovina nebo směs těchto látek (Obr. 2-5):



Obr. 2-5 První fáze reakce, při níž vzniká monodimetylmočovina [3].

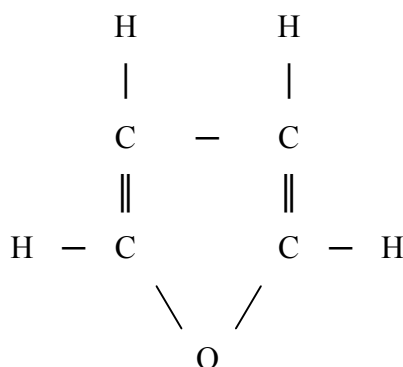
Z mono a dimetylmočoviny vznikají složité deriváty s lineární strukturou, které obsahují metylové skupiny, eterové a metylenové můstky. Když je dosaženo požadovaného kondenzačního stupně, reakce se přerušují zavedením alkalického prostředí. Tento meziprodukt, dosud nevytvrzený, má lineární řetězovitou strukturu (Obr. 2-6):



Obr. 2-6 Lineární řetězovitá struktura meziproduktu při výrobě močovinoformaldehydových pryskyřic [3].

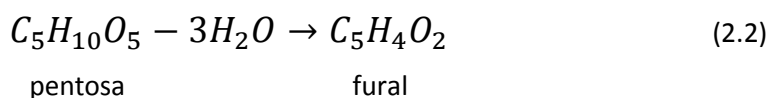
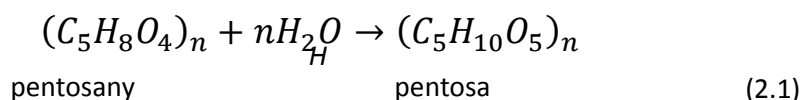
Přyskyřice jsou obvykle ve formě vodního roztoku, případně se zahušťují nebo v zájmu stability se suší [3].

- c) *Furanové pryskyřice* – furanová pojiva mají pojmenování od základního heterocyklického uhlovodíku furanu C_4H_4O .



Obr. 2-7 Schéma strukturního vzorce furanu [3].

Základní surovinou pro přípravu furanových pojiv je jednoduchý derivát furanu – fural $C_5H_4O_2$. Je to nejpřístupnější furanový derivát, který je možno získat hydrolyzou pentosanů, obsažených ve většině rostlinných látek. Fural je po chemické stránce velmi reaktivní sloučenina. Chemie furalu je neobyčejně rozmanitá a tím i jeho možnosti využití. Surovinou pro výrobu furalu jsou dřeviny a rostlinné látky, obsahující pentosany obvykle v rozsahu 20 až 40% a vyskytují se v ekonomickém dosahu a množství v místě výroby. Přeměna pentosanů v surovině na fural probíhá v podstatě ve dvou reakcích, a to v hydrolyze pentosanů na pentosy a dehydrataci pentos na fural.



Furanové pryskyřice používané ve slévárenství jsou kopolymery furfurylalkoholu, močoviny nebo fenolu a formaldehydu [3].

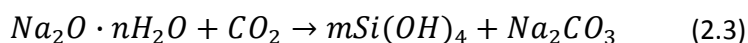
- *Vodní sklo* – patří do anorganické chemie. Ve slévárenství slouží k výrobě forem. Jádra se nedoporučují pomocí vodního skla vyrábět pro jeho velkou zbytkovou pevnost (špatná rozpadavost).

Podle způsobu tuhnutí vodního skla ve formovacích směsích můžeme směsi rozdělit na:

- směsi s ovládaným ztužováním pomocí profukování oxidem uhličitým (vzniká kyselina křemičitá → gelace)
- směsi bez ovládaného ztužování pomocí katalyzátorů kyselé povahy nebo tuhnoucí vzdušnou hydratací [3].

Pojivový systém vodní sklo CO_2 (výroba CT směsí)

Křemičité ostřívo s vodním sklem se upěchuje v rámu nebo v jádru a profoukne se oxidem uhličitým. Tento způsob se používá jak pro výrobu forem, tak jader. Celý velice složitý proces se může zapsat chemickou rovnicí:



(*vodní sklo + oxid uhličitý → gel kyseliny křemičité + soda*)

Oxid uhličitý je suchý, kyselý plyn, který vodní sklo vysuší a současně převede do kyselé rosolovité podoby, tím vzniká gel kyseliny křemičité. Gel kyseliny křemičité postupně přechází v kompaktní hmotu, která získává pevnost v tlaku cca 1MPa. Dalším produktem je uhličitan sodný, tzv. soda. Ta se může při vyšších teplotách rozkládat na plyn Na_2O , který je škodlivý pro možnost naplynění taveniny. Celé používání směsí na bázi vodního skla souvisí s jeho horší rozpadavostí. Proto se v současné době zkouší do vodního skla přidávat různá aditiva, které podporují rozpadavost směsí po jejich vytvrzení – tj. snižují zbytkovou pevnost směsi po odlití. Za uplynulých 40 let byla vyvinuta celá řada dalších variant směsí na bázi

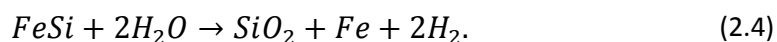
vodního skla, jako samotvrdnoucí s práškovými nebo kapalnými tvrdidly – estery.

Pojivový systém samotvrdnoucích směsí s vodním sklem (ST – směsí)

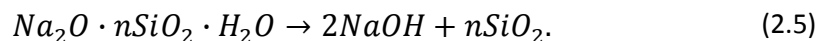
Jsou to směsi s vodním sklem, kdy je proces vytvrzování založen na jiném principu a je doprovázen buď exotermickou reakcí, nebo bez exotermické reakce.

K těmto metodám patří ST směsi vytvrzované práškovými čistými kovy (Al, Zn, atd.) nebo práškovým FeSi nebo CaSi, což je N-metoda (Nishyama – proces). Obě skupiny ST směsí využívají principu rozkladu vody kovem (reakce alkalických roztoků s kovy) za vzniku vodíku a velkého tepelného efektu, který podporuje dehydrataci alkalického křemičitanu.

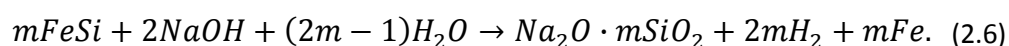
N-proces vychází z velké slučivosti (afinitě) kyslíku s křemíkem:



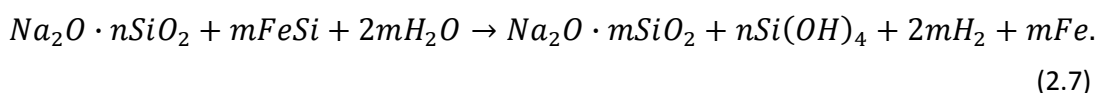
Průběh exotermické reakce je říditelný variací obsahů vodního skla a FeSi ve směsi:



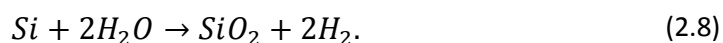
FeSi reaguje s NaOH:



Proces je silně exotermickou reakcí a probíhá tak dlouho, dokud nejsou FeSi a voda spotřebovány:



Celý proces lze zapsat zjednodušeně:



Nevýhodou N-procesu je vznik vodíku, který se vzduchem tvoří třaskavou směs. Rovněž vysoká teplota směsi působí nepříznivě na laky modelů a jaderníků. Uplatnění našly ST směsi vytvrzované práškovými nebo kapalnými tvrdidly.

Nesnadná rozpadavost forem s vodním sklem dala základ pro další způsoby vytvrzování vodního skla.

Vodní sklo může být vytvrzováno esterolem, který obsahuje dvě složky esterů. Jedna složka má nízkou rychlost vytvrzování, druhá vysokou rychlost vytvrzování. Esterol je hnědá až žlutá kapalina, bez zápachu a nemá agresivní účinky. Je netoxická a nehořlavá, v uzavřených nádobách je dlouho skladovatelná. Vytvrzovací proces je založen na dvoustupňové reakci. V prvním stupni dochází v alkoholickém prostředí vodního skla k rozkladu esteru, kdy se uvolňuje kyselina. V druhém stupni dochází vlivem uvolněné kyseliny k želatinaci vodního skla a ke vzniku pojivových gelů kyseliny křemičité. Mechanismus je podobný jako při reakci vodního skla s CO_2 . Za výhodu vodního skla s esterolem lze pokládat velmi dobrou rozpadavost vytvrzené směsi [4].

- *Olejová pojiva* – jsou určena pro výrobu jader, pojivový systém je založen na vysušení pojiva při teplotě cca 250°C .
- *Sacharidy (melasa, škrob, dextrin)* – jsou určeny pro výrobu jader, zajišťují dobrou pevnost po vysušení.

Pojiva 3. generace – nejedná se o pojiva v tom pravém slova smyslu, jde spíše o pojivové systémy, neboť využíváme fyzikálních účinků pojení. Jde například o formování v magnetickém poli, metoda zmrazování nebo formování ve vakuu.

2.1.3 Přířady

Jsou to látky ve formovací směsi, které zlepšují vlastnosti slévárenské formy. Např. zvyšují prodyšnost, rozpadavost, vyšší odolnost proti nejrůznějším

povrchovým vadám odlitků (např. zapečeninám). Typickou přísadou je kamenouhelná moučka (letek), dále se používají též dřevěné piliny atd. Dřevěné piliny po odlití vyhoří a ve formě vytvoří kanálky, čímž se zvýší prodyšnost a současně se umožní dilatace formy.

2.1.4 Voda

Voda působí ve formovací směsi jako plastifikátor, tj. dává formovací směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování. Vody ve formě bývá kolem 3 až 4 hmotnostních procent. Je podstatou pro formy syrové (nevysušené).

2.2 Mechanismus vzniku plynů v pískových formách

V okamžiku, kdy dojde ke kontaktu taveniny a líce formy, začíná sdílení tepla mezi taveninou a formou. Jelikož je tavenina teplejší, než forma dochází vlivem nerovnosti teplot k prohřívání jednotlivých vrstev slévárenské formy. Rychlost a hloubka, do které se forma prohřeje na určitou teplotu, se řídí teplotními podmínkami na rozhraní tavenina-forma a také na teplotně fyzikálních vlastnostech slévárenské formy (tepelná vodivost, hustota, měrná tepelná kapacita, atd.). Při zjednodušujících předpokladech, je možné hloubku prohřátí formy H_F v určitém čase t a určité teplotě T vypočítat pomocí vztahu:

$$H_F = K_F \cdot \sqrt{t}, \quad (2.9)$$

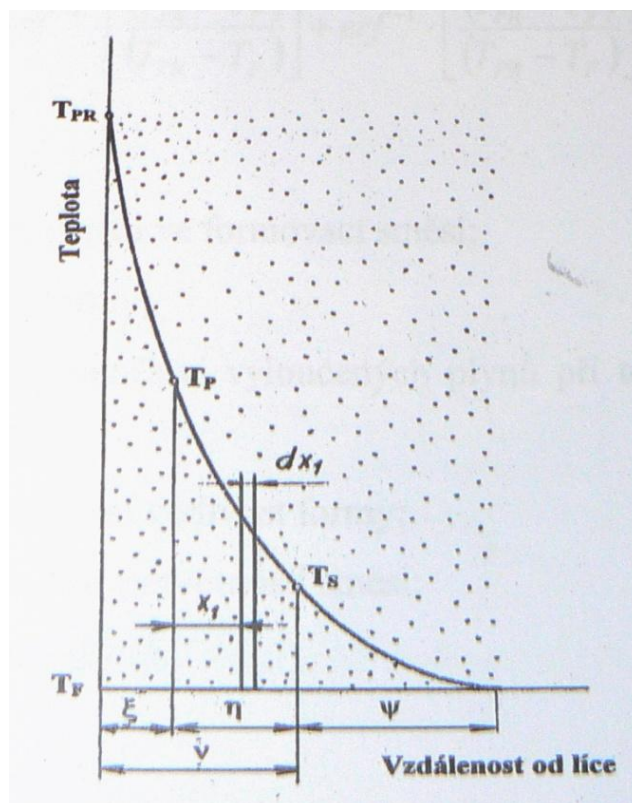
kde značí: K_F – koeficient prohřátí formy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$];

H_F – hloubka prohřátí formy [m];

t – doba ohřevu formy [s].

Díky prohřívání nastávají u některých složek formovací směsi výrazné fyzikálně-chemické přeměny. Tyto přeměny jsou doprovázeny uvolňováním plynů (vypařování vody a jiných kapalných látek-rozpouštědel; spalování organických látek; tepelným rozkladem minerálů; rozkladem různých látek, při kterém vznikají plyny; rozpínání vzduchu obsaženého ve formovací směsi). Tato schopnost

formovací směsi uvolňovat plyny se nazývá plynatost. Tímto problémem se zabývali Ryžikov a Spasskij. Pro řešení je potřeba rozdělit formu do jednotlivých vrstev dle teploty, jak je to znázorněno na obr. 2-8.



Obr. 2-8 Rozdělení pískové formy do jednotlivých vrstev [4].

1. *vrstva* ξ – jedná se o teplotní interval T_{PR} a T_P (přičemž T_{PR} -teplota na líci formy; T_P -teplota, kdy končí vylučování plynů). V této vrstvě je vývin plynů již ukončen.
2. *vrstva* η – jedná se o teplotní interval od T_P až T_S (přičemž T_S -je teplota při níž dochází k vylučování plynů ve formě).
3. *vrstva* ψ – jedná se o teplotní interval od T_S až do T_F (přičemž T_F -je počáteční teplota formy). V této vrstvě k vývinu plynů nedochází, jelikož zde nejsou potřebné teplotní podmínky.

Nejdůležitější pro nás je množství uvolněných plynů v daném časovém okamžiku. Z výše napsaných poznatků je patrné, že se plyny uvolňují z 1. a 2. vrstvy. Přičemž z 1. vrstvy se plyny již uvolnily a vylučují se již jen z 2. vrstvy. Pro toto

řešení lze využít Gaussova integrálu chyby. Množství uvolněných plynů 1. a 2. vrstvy lze vypočítat pomocí vztahu 2.10.

$$Q = s \cdot \rho_F \cdot q_{TP} \cdot \sqrt{a} \cdot \left\{ \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left[\frac{(T_{PR}-T_P)}{(T_{PR}-T_F)} \right] + \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left[\frac{(T_{PR}-T_S)}{(T_{PR}-T_F)} \right] \right\} \cdot \sqrt{t} = A \cdot \sqrt{t}, \quad (2.10)$$

kde značí: s – procento pojiva ve formovací směsi;

ρ_F – hustota formy;

q_{TP} – měrné množství vyloučených plynů při teplotě T_P ;

a – střední teplotní vodivost formy;

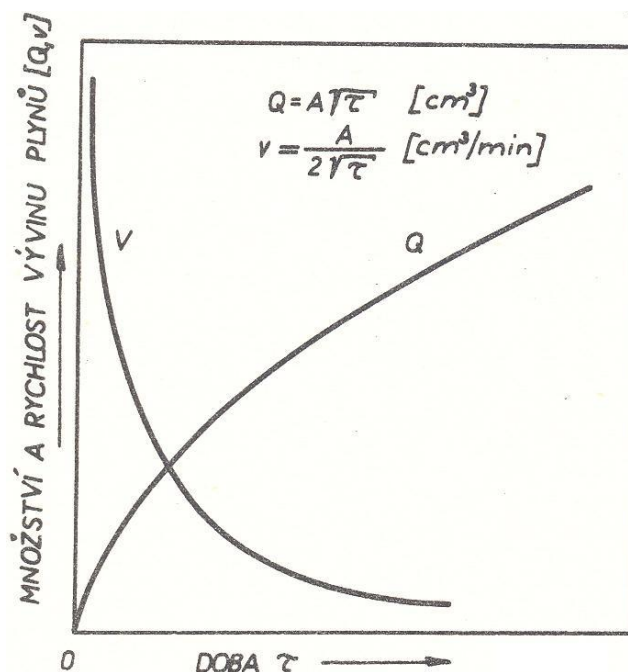
A – součinitel plynotvornosti směsi;

t – čas vývinu plynů.

Pomocí vztahu 2.11 je možné vypočítat rychlost uvolňujících se plynů [4].

$$v = \frac{dQ}{dt} = \frac{A}{2\sqrt{t}}. \quad (2.11)$$

Na obr. 2-9 je znázorněna rychlost a množství uvolněných plynů v závislosti na čase.



Obr. 2-9 Závislost množství vyloučených plynů a jejich okamžitá rychlost na čase [6].

2.2.1 Plynotvornost formovacích směsí

Vznik plynů a par při ohřívání formovací směsi taveninou se nazývá plynotvornost. Uvolňování plynů a par je nežádoucí jev, který doprovází formovací materiály. Hodnoty plynatosti by měly být co nejmenší. V okamžiku, kdy začne tuhnout tavenina, se postupně začnou prohřívat jednotlivé vrstvy slévárenské formy. Písková forma se prohřívá postupně od líce formy po jednotlivých vrstvách. Jakmile vrstvy pískové formy dosáhnou např. teploty vypařování vody, započne uvolňování plynů a par v jednotlivých vrstvách.

Plynotvornost se vyjadřuje v cm³ na 1g směsi. Množství uvolněných plynů závisí na druhu použitého pojiva a jeho množství, navlhavosti směsi, zrnitosti a množství a druhu různých přísad přidaných z technologických důvodů, nebo jako přípravek sloužící pro vytvrzení směsi. Vývin plynů má na odlitek škodlivý vliv. Závisí na množství, prudkosti jejich vývinu a jejich složení.

Vedle množství uvolněných plynů je také důležitý okamžik jejich uvolnění ve fázi tuhnutí kovu. Z jednotlivých složek formovací směsi vykazuje velkou plynatost voda a další kapalná rozpouštědla, pojivo, organické přísady atd.

Unikající plyny, tvoří určitou směs, v které převládají CO a H₂. Při jejich úniku do atmosféry vzniká určitý tlak, jehož velikost závisí na množství a rychlosti uvolněných plynů a na odporu proti pronikání plynu, který vytváří forma. Pokud je tento plyn na lici formy velký, hrozí nebezpečí pronikání plynu do taveniny a způsobit tak bublinové vady u budoucího odlitku.

Po zahřátí se nejprve plyn začne vylučovat z částí, které mají nejnižší teplotu rozkladu a postupně se k nim přidávají části s vyšší teplotou rozkladu.

Ve vrstvě u líce formy se plyny uvolňují bezprostředně po odlití a to ve velmi krátkém čase. Za touto první vrstvou se nacházejí další zóny, kde se začíná uvolňovat chemicky vázaná voda z bentonitu a minerálních příměsí a celý proces je ukončen vypařením mechanicky přimíšené vody. Dále následuje zóna, kde probíhá kondenzace par a plynů. V poslední vrstvě neprobíhají žádné změny.

Jednotlivé vrstvy nejsou ostře ohraničeny, jelikož mezi nimi jsou přechodové zóny. Vrstvy vznikají v důsledku ztráty mechanických a tepelně-fyzikálních vlastností formovacích směsí [4].

K hlavním příčinám plynatosti ve formovací směsi patří:

- tepelná roztažnost vzduchu v dutině formy;
- vypařování volné vody a jiných kapalných látek;
- dehydratace jílových pojiv;
- tepelná disociace vodní páry a uvolňujících se plynů;
- spalování organických látek, uhlíkových přísad;
- tepelný rozklad minerálů a uhličitánů.

2.2.2 Způsoby vzniku plynů

1. *vypařování vody a jiných rozpouštědel* – vypařování vody má největší podíl na vzniku plynatosti a to zejména u jílu v syrových pískových formách. Vedle vody mohou směsi obsahovat různá kapalná rozpouštědla, která se mechanicky do směsi přidávají. Voda, která formovací směsi obsahují je ve směsi vázána třemi základními způsoby (chemicky – je součástí krystalové mřížky minerálů, uvolňuje se při poměrně vysokých teplotách; fyzikálně-chemicky – voda tvoří disperzní prostředí koloidních soustav pojiv; mechanicky – je založena na působení kapilárních a smáčivých sil).
2. *spalování organických látek* – spalování probíhá za přítomnosti vzdušného kyslíku, vodních par a CO_2 . Vzdušný kyslík může prostupovat prostřednictvím difúze přes póry, nehledě na to, že na samotném počátku procesu je ve směsi vzduch obsažen v pórech. Ve skutečnosti je zdroj kyslíku omezen a v okamžiku odlití je průchod kyslíku prakticky zastaven. Při porovnání vlivu plynů v pórech na celkovou plynatost s plyny vznikajícími plynů, je malý. Velmi významná je reakce oxidace tuhého uhlíku, ještě větší význam má reakce okysličování tuhého uhlíku vodními parami.
3. *tepelný rozklad organických látek* – tepelný rozklad organických látek probíhá pomalu a to bez nebo s omezeným přístupem vzduchu. Nastává porucha struktury a destilace lehčích a při nárůstu teploty i těžších frakcí. Výsledným produktem této reakce je koks. Chemické složení vzniklých par a plynů při tepelném rozkladu je charakterizováno větším množstvím vodních par, olejů, nasycených a nenasycených uhlovodíků, dále H , CO , CO_2 a další

plynné a kapalné produkty. Pokud póry formovací směsi neobsahují O_2 ke shoření látek nedochází.

4. *tepelný rozklad minerálů* – nastává při ohřevu u některých minerálů, které jsou obsaženy ve formovací směsi. Tento rozklad je doprovázen uvolňováním plynné složky, z vody, která je v minerálech vázána ve třech podobách (konstituční voda-je nejpevněji vázána na krystalovou mřížku, po ztrátě této vody se minerál rozpadá; krystalizační voda-k mřížce je vázána slaběji a uvolňuje se např. při žhání; volně vázaná voda-s mřížkou není chemicky vázána).
5. *disociace plynů* – tímto způsobem se nejčastěji rozkládají uhlovodíky a to při vysokých teplotách. Je doprovázena zvětšováním objemu plynů a usazování uhlíku ve formě sazí.
6. *rozpínání vzduchu* – množství vzduchu a dalších plynů, které obsahují póry formovací směsi, tvoří přibližně 26 až 38% objemu směsi. Tento objem se řídí velikostí zhuštění formovací směsi a podílí se jen velmi malou částí na celkové plynatosti směsi.

2.2.3 Popis vzniku plynu z formy a jeho pronikání do taveniny

Nejdůležitější je, aby vzniklé plyny nevnikaly z formy do dutiny formy a tím do taveniny. Bubliny plynu vznikají na hranici forma-kov, v místech vyústění pórů nebo v různých defektech povrchu. Obecně lze průnik bubliny do kovu a opačně přes rozhraní forma-kov vyjádřit rovnicí:

$$P_F \gtrless \Sigma P, \quad (2.12)$$

kde značí: P_F – tlak plynů, $\Sigma P = P_A + P_B + P_C$;

P_A – metalostatický tlak;

P_B – protitlak kovu (povrchové napětí kovu a tuhnoucí kůry);

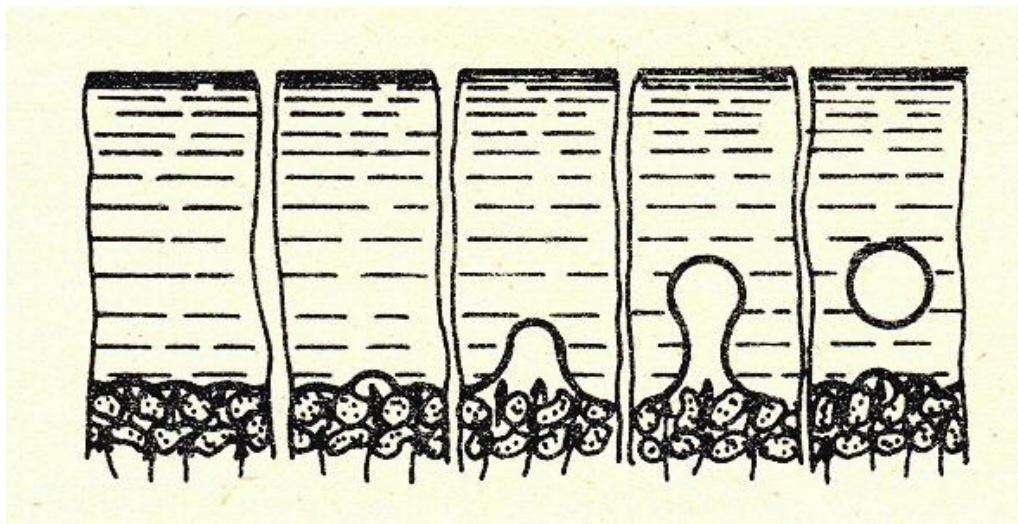
P_C – zbytkový tlak plynů v dutině formy nad hladinou kovu.

Při $P_F < \Sigma P$ – jsou vytvořeny podmínky pro průnik kovu do pórů formy (vznik zapečenin).

Při $P_F = \Sigma P$ – je vytvořená přirozená hranice mezi formou a kovem a je jí dána drsnost povrchu odlitku, která závisí na velikosti pórů.

Při $P_F > \Sigma P$ – bubliny vznikajícího plynu vnikají do taveniny kovu [6].

Při styku kovu s lícem formy má vývin plynů největší rychlost. V tuto chvíli je na povrchu líce formy jen malá tloušťka ztuhlého kovu a malý metalostatický tlak. Ze studia kinetiky pronikání plynu do kovu, je zřejmé, že ke vzniku bublin může sloužit i několik pórů mezi zrny současně jak je znázorněno na obr. 2-10.



Obr. 2-10 Kinetika vzniku plynové bubliny [6].

Z obr. 2-10 je také vidět jak celý průnik plynu do taveniny probíhá. Po odlití se začnou na hranici forma-kov pomocí pórů dostávat uvolněné plyny. Tyto plyny se zde shromažďují a jejich množství v tomto místě stále narůstá. Tím narůstá také tlak vzniklých plynů. V okamžiku, kdy překoná tlak plynů odpor kovu proti jejich vniknutí, započne tvorba zárodku bubliny. Při dalším zvyšování tlaku dochází k zvětšování a následném zaškrcení a uvolnění bubliny do taveniny. Tento proces se opakuje až do té doby, dokud neskončí chemické změny ve formě.

Z toho vyplývá, že pro průnik plynu do kovu je možný jen tehdy, je-li tlak vzniklých plynů větší než tlak kovu.

Vznik plynových bublin v odlitku zapříčiňuje více činitelů najednou (volba pojiv, množství použitého pojiva ve směsi, zrnitost, prodyšnost a také navlhavost formovací směsi). Vedle volby správné formovací směsi má na vznik plynových bublin vliv způsob lití a hlavně jeho rychlost.

2.3 Metody sledování plynatosti

Pro sledování plynatosti formovacích směsí využíváme metody, které lze rozdělit do dvou základních skupin, a to metody laboratorní (nepřímé) a metody

provozní (přímé). Tyto metody se liší způsobem působení tepla na formovací směs a také velikostí zkoušeného vzorku.

U metod provozních se k měření používá upraveného vzorku, části formy nebo forma celá. Ohřev se provádí přímým kontaktem roztaveného kovu s formovací směsí.

Při provádění měření nepřímou metodou se na vzorek, vážící jen pár gramů, působí sálavým teplem v elektrické odporové peci. Do pece se vzorek vkládá na keramické lodičky.

K určení kvality formovacích směsí je důležité vedle určení množství vzniklého plynu určit také dobu uvolňování plynů, a to proto, že vzniklé plyny jsou pro budoucí odlitek škodlivé do doby vytvoření dostatečně silné povrchové vrstvy, skrz kterou již plyny nemohou vniknout do stěn odlitku. Zaznamenávání množství plynu v závislosti na čase lze provést dvěma způsoby a to změnou tlaku v závislosti na čase nebo změnou objemu v závislosti na čase.

K měření plynatosti vznikla celá řada metod, u kterých zatím nedošlo k sjednocení měřících podmínek, liší se např. použitou teplotou ohřevu. Z toho to důvodu nelze jednotlivé hodnoty z různých metod porovnávat. Srovnávat naměřené hodnoty plynatosti je možné jen u měření provedených stejnou metodou.

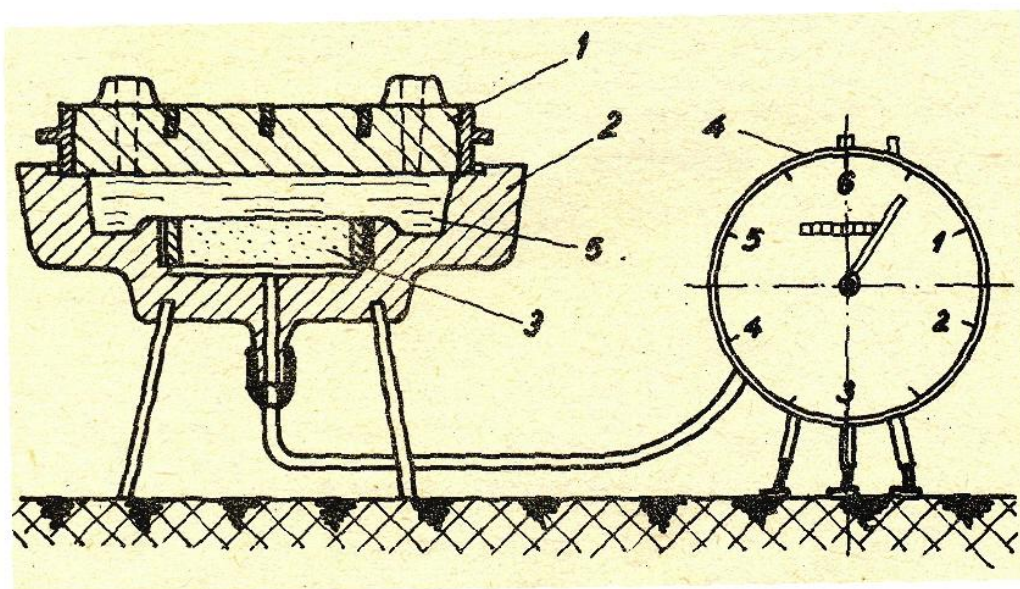
2.3.1 Metody provozní (přímé)

Pro tuto metodu se využívá formy nebo jádra zkoumaného odlitku, eventuálně speciální vzorky upravené různými způsoby. Směs je spěchována a její ohřev je proveden přímo tekutým kovem. Velikost objemu vyvinutého plynu je snímána pomocí tlakoměrů či plynoměrů. Při této metodě odpovídá průběh tlaku skutečnému průběhu vývinu plynů. Rychlost stejně jako objem uvolněných plynů je vztažena na jednotku času. Tato metoda má několik možných variant měření, které se odlišují druhem formy, velikostí vzorku atd. Metody přímé nám přinášejí lepší představu o tom, jak se formy chovají při odlévání a tuhnutí kovu. Mezi tyto metody patří metoda Berga, Medvěděva, Schielda aj. [5].

- 1) Metoda dle Spasského – do keramického prstence se zaformuje formovací směs. Jeho středem je pomocí křemenné trubice odváděn plyn. Konec trubice ústí do hermeticky uzavřené nádoby mající objem 19300cm³ a je opatřena

tlakoměrem (jedná se o membránu z tenkého plechu, na kterou jsou připojeny tenzometry, které zaznamenávají průhyb membrány). Ze znalosti tlaku a vnitřního objemu nádoby je možné spočítat objem uvolněných plynů [4].

- 2) Metoda dle Berga a Medvědova – zkušební jádro má $\varnothing 150$ mm s pracovním povrchem 176 cm^2 a tloušťkou 50 mm. Vzorek je zaléván ve speciální kokile kovem. Plyn, který se uvolňuje, je odváděn trubicí do vodního měřiče objemu. Jedinou podmínkou, která musí být splněna je, že kov musí formu zaplnit a překrýt vzorek v co nejkratším čase, aby se zamezil únik plynů do dutiny formy [6]. Schematické znázornění principu této metody je znázorněno na obr. 2-11.



1 – vršek formy, 2 – kokila, 3 – zkušební jádro, 4 – měřič množství plynu, 5 - odlitek

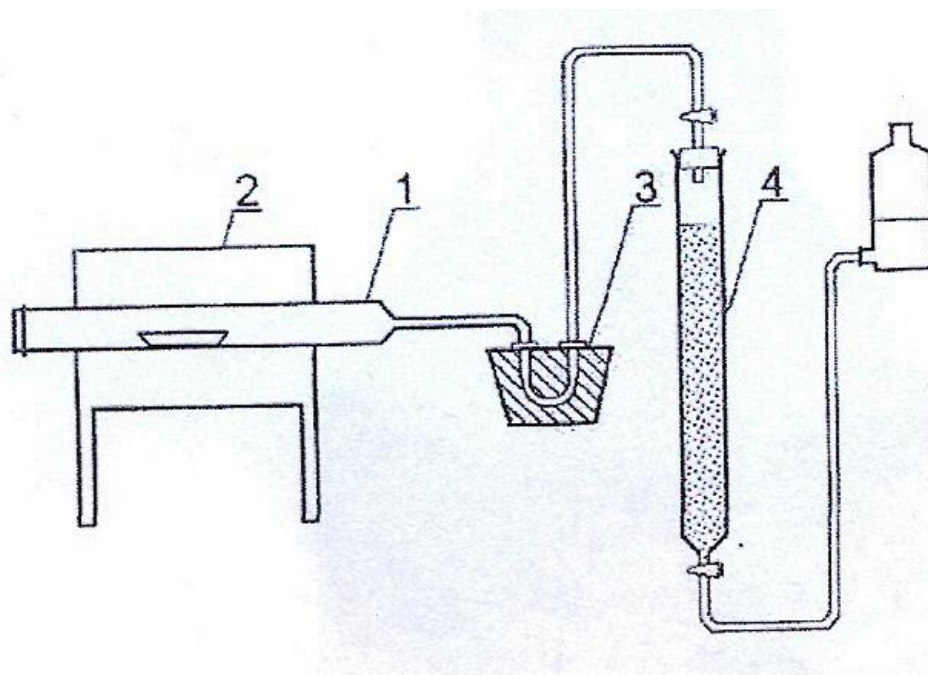
Obr. 2-11 Přímá metoda sledování plynatosti dle Berga a Medvědova [6].

- 3) Metoda dle Jašina – formovací směs se zaformuje do speciálního tvaru. Poté je vzorek vložen do kovové formy. Na spodní část vzorku přitéká roztavený kov. Poté co je směs zalita kovem se prstenec uvolní a zkoušená směs se rozpadne. Plynotvornost se určuje dle míry rozpadu směsi. Objem, uvolněných plynů, se stanoví pomocí empirických vztahů [4].
- 4) Metoda dle Piščeva – vzorek je umístěn ve středu kovové formy. Uvolňující se plyny se odvádějí pomocí trubky, jenž je spojena s měřícím přístrojem

snímajícím tlak a objem. Hodnoty se odečítají ve stanovených časových intervalech. Vzorek je možno zalévat dvěma způsoby, a to jen z části nebo celý [4].

2.3.2 Metody laboratorní (nepřímé)

Tyto metody, jsou založeny na zahřívání malého množství vzorku formovací směsí. Vzorek se do pece vkládá v keramické lodičce. Zkouška se provádí např. v Marsově peci, jejíž schéma je znázorněno na obr. 2-12.



1 – žáruvzdorná trubice s lodičkou se vzorkem písku; 2 – Marsova pec; 3 – chladič;
4 – eudioměr.

Obr. 2-12 Schéma přístroje na stanovení plynatosti formovacích směsí [5].

Vzniklé plyny z trubice pece proudí chladičem do různě sestaveného eudiometru (skleněná kalibrovaná trubice pro měření objemu plynů).

Další přístroje podobného uspořádání použili ve 30. a 40. letech minulého století např. Grassmann, Dietert, Nizovcev a jiní, jak uvádí Petržela. Hlavním nedostatkem tohoto zařízení bylo vyloučení kondenzátu, který v kritickém okamžiku působí jako plyn.

Během času byly vyvinuty metody, při kterých je zahřívána rozmělněná navážka zkoumané směsi v peci na zvolenou teplotu, která činí 600 až 1300°C.

K měření se využívá tzv. vlastní atmosféry (měřicí aparatura je vyplněna plyny, které se uvolňují při měření), popřípadě je měřicí zařízení naplněno netečným plynem. Různé druhy atmosfér se využívají proto, aby se zaručila stálost případných vlivů a vyloučila se možnost hoření za přítomnosti vzdušného kyslíku, nebo CO_2 .

Mezi nejrozšířenější zařízení pro sledování plynatosti se řadí přístroj firmy +GF+ PGD. Tento přístroj pracuje v rozmezí teplot 800 až 1000°C, používá se zde neutrální dusíkaté atmosféry a magnetického dávkovacího zařízení pro vzorky o hmotnosti 1g. Pro měření množství uvolněného plynu slouží měřicí byreta s vyrovnávací nádobkou a po vstřelení vzorku do pece měří i čas [5].

Z výše napsaného je zřejmé, že nepřímé metody používají navážku vážící jen pár gramů, která se vkládá do keramické lodičky. Zahřívání vzorku se děje sálavým teplem, a to při teplotách 800 až 1300°C. Celé měření je závislé na změně tlaku a objemu závislých na čase. Není při nich však zahrnuta celková tloušťka stěny formy a vzorek je zahříván po celou dobu konstantní teplotou, ve skutečnosti tomu tak však není.

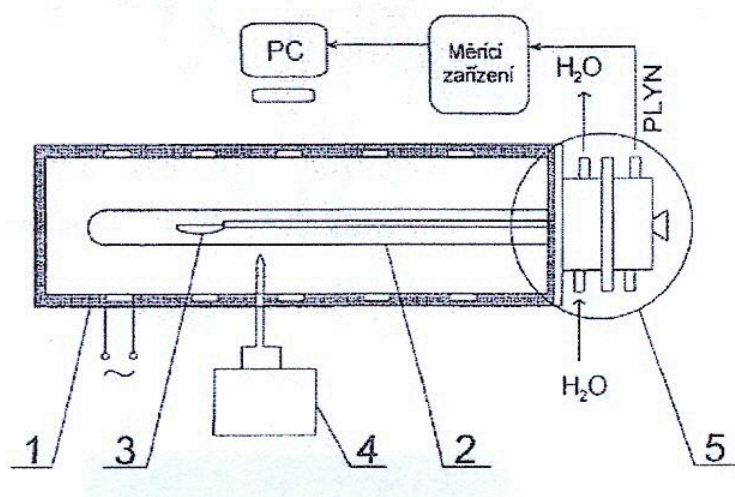
3. Experimentální část práce

Experimentální část mé diplomové práce je zaměřena na sledování vzniku plynatosti u formovacích a jádrových směsí, o různém složení a zahříváním na tři různé teploty (800°C; 1000°C; 1200°C). Měření plynatosti se uskutečnilo na měřicí soustavě, jenž byla navržena a zkonstruována na našem pracovišti (Katedra strojírenské technologie – Fakulty strojní, TU v Liberci).

3.1 Charakteristika měřicího zařízení

Zařízení používané k měření plynatosti v laboratoři katedry strojírenské technologie prošlo již několikaletým vývojem, který i nadále probíhá. Celá měřicí soustava pracuje na principu snímání uvolňujících se plynů ze spalujícího se vzorku v elektrické peci. Stejnou metodu měření používá i přístroj PGD, vyvinutý firmou +GF+. Metoda je založena na ohřevu vzorku sálavým teplem v uzavřené peci, která je spojena jen s měřicí soustavou. Pomocí počítačového programu DaqView můžeme sledovat změnu napětí v daném časovém intervalu. Zaznamenávané hodnoty napětí posléze přepočteme na tlak a dále pak na objem uvolněných plynů z formovací směsi.

Naše měřicí soustava, jejíž schéma je na obr. 3-1 zaznamenává tlak uvolňujících se plynů ze zahřívajících se vzorků.

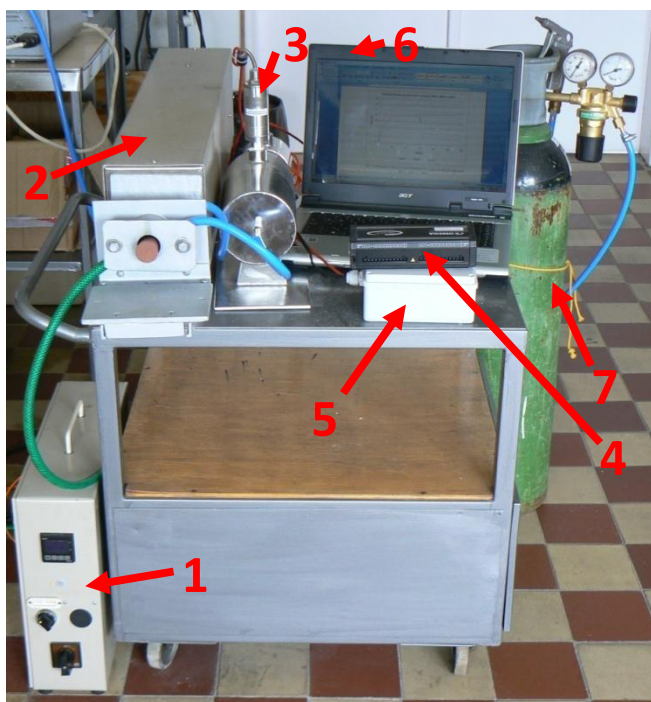


- 1 – Elektrická odporová pec; 2 – Křemenná zatavená trubice; 3 – Lodička pro vzorek; 4 – Regulátor pece; 5 – Snímací hlavice s chlazením.

Obr. 3-1 Blokové schéma měřicího zařízení [5].

Při měření se postupuje tímto postupem: Vzorek vybrané formovací směsi, který má hmotnost $1 \pm 0,01\text{g}$, vložíme v molybdenové lodičce do skleněné trubice nacházející se v elektrické odporové trubkové peci. Lodička se vzorkem je již od počátku vložení do pece zahřívána sálavým teplem.

Pomocí našeho zařízení můžeme provádět měření až do teploty 1300°C (čím vyšší teplotu používáme, tím je také rychlejší ohřev vzorků v lodičce). Při měření používáme moderní snímače teploty a tlaků, sběrnici dat a následné vyhodnocování digitálního signálu a jeho následné vykreslování na displeji připojeného PC. Celá měřicí soustava je zobrazena na obr. 3-2.



1-regulátor pece; 2-Marsova pec; 3-tlakové čidlo; 4-sběrnice dat; 5-zdroj napětí sběrnice; 6-PC; 7-tlaková nádoba na plyn.

Obr. 3-2 Zmodernizovaná soustava k měření plynatosti.

Před započítím samotného měření, je nutné provést určité kroky, aby měření bylo správně provedeno. Jedná se o kontrolu propojených hadic chladicího okruhu a hadice propojující pec s tlakovým čidlem. Nastavení správné teploty na regulátoru teploty pece, spuštění chladicího okruhu (chlazení uzavírací hubice pece). Zkontrolovat správné nastavení jednotek a dalších parametrů v programu DaqView.

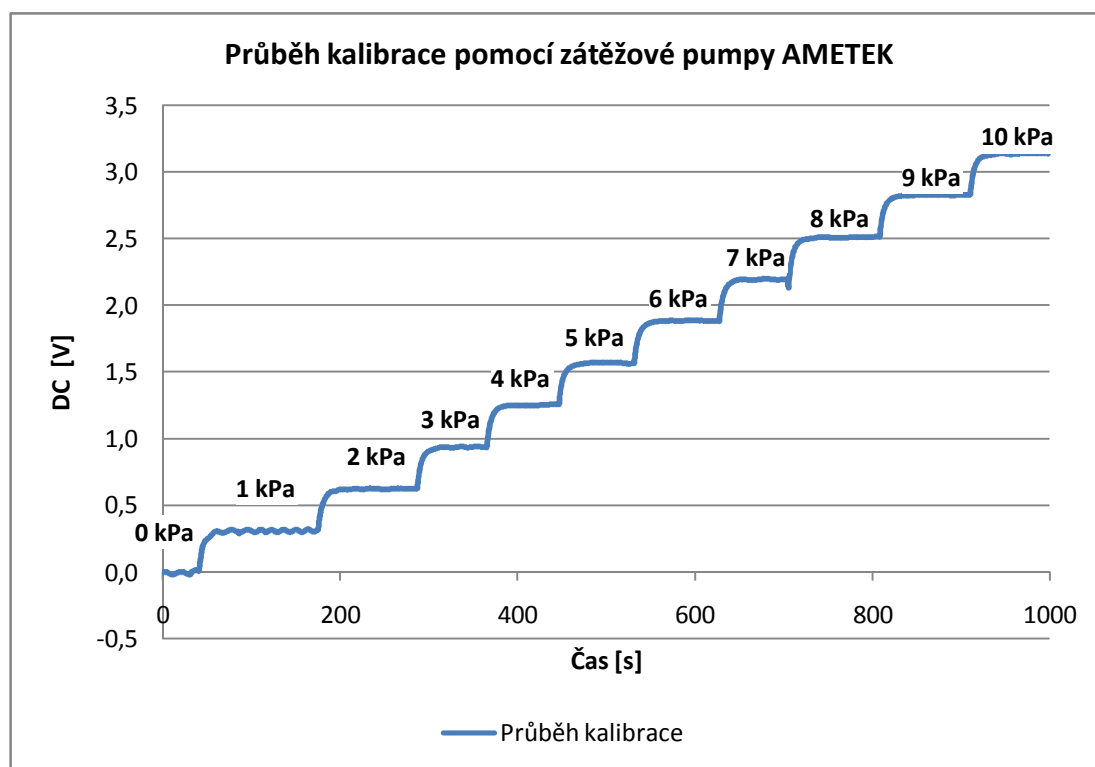
Jakmile, je měření u konce, odpojíme veškerá elektrická zařízení a ponecháme v chodu pouze chladicí okruh a pokud, je potřeba, povytáhneme čelo pece se skleněnou trubicí ven pro rychlejší vychladnutí pece.

3.1.1 Kalibrace zařízení

Z důvodu vyměnění porouchaného měřicího čidla bylo nutné provést kalibraci měřicího zařízení. Nezávisle na sobě byly provedeny dvě různé kalibrace a to pomocí zátěžové pumpy AMETEK a chemickou kalibrací založenou na rozkladu CaCO_3 .

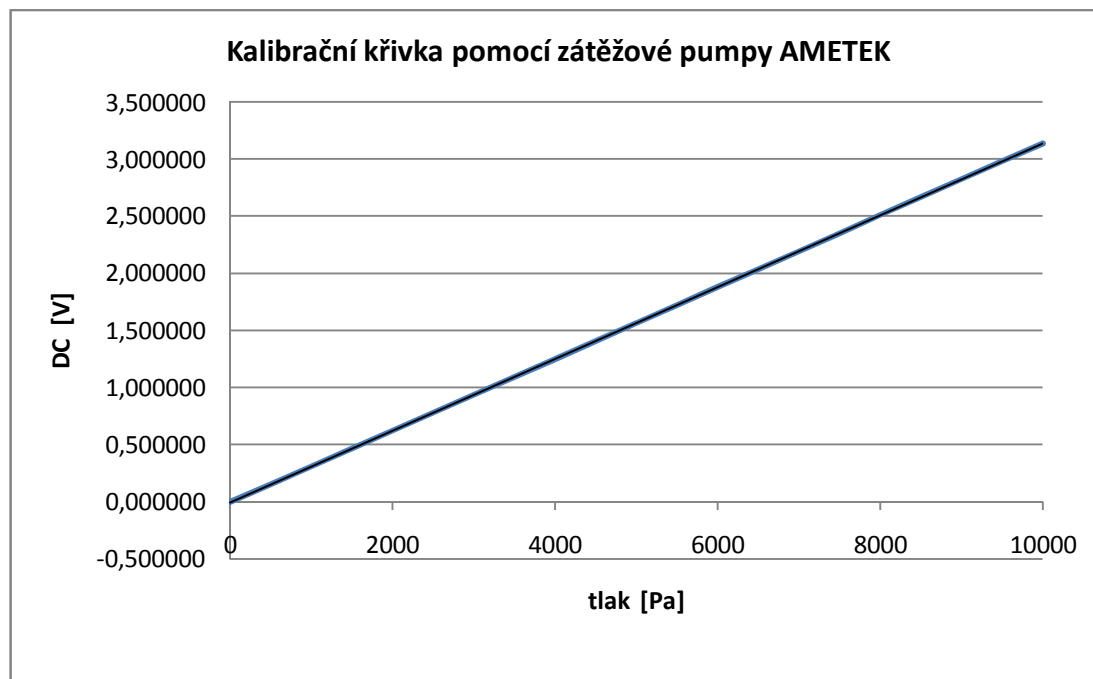
Kalibrace zátěžovou pumpou

Zátěžová pumpa AMETEK se nachází na Katedře energetických zařízení na TU v Liberci. Kalibrace je založena na principu změny vstupního tlaku, která je vyvolána pomocí kalibračních závaží působících na danou plochu. Změna tlaku je prováděna v rozsahu 1 až 10 kPa. Vzniklá kalibrační křivka je znázorněna v závislosti zatěžujícího tlaku na změřeném napětí měřicí soustavy. Hodnoty napětí, jsou zobrazována a zaznamenávána pomocí softwaru DaqView. Změna napětí za průběhu kalibrace je znázorněna na obr. 3-3.



Obr. 3-3 Průběh kalibrace pomocí zátěžové pumpy AMETEK.

Dále byla na základě výstupního napětí a změně tlaku sestrojena kalibrační křivka obr. 3-4.



Obr. 3-4 Kalibrační křivka získaná pomocí zátěžové pumpy AMETEK.

Z hodnot získaných při kalibraci, jsme stanovili kalibrační konstantu pro hodnoty tlaků 0 až 10kPa (tabulka 3.1). Rozmezí 0 až 1000Pa odpovídá konstanta 0,000313249, která je rovna 1Pa. Tato hodnota konstanty byla použita pro všechna měření v mé diplomové práci.

Tabulka 3.1 Kalibrační konstanty z kalibrace pomocí zátěžové pumpy AMETEK pro jednotlivé tlaky.

Tlaky vyvozené na zátěžové pumpě [Pa]	Změřená jednotlivá napětí [V]	Zjištěné přepočtení konstanty [Pa · V⁻¹]
1000	0,307826	0,000309958
2000	0,623720	0,000312926
3000	0,937229	0,000313121
4000	1,249031	0,000312791
5000	1,564560	0,000313338

6000	1,882303	0,000314073
7000	2,192078	0,000313459
8000	2,511569	0,000314213
9000	2,828354	0,000314498
10000	3,139013	0,000314115
Průměrná přepočtení konstanta:		0,000313249

Chemická kalibrace pomocí CaCO_3

Druhou kalibraci provedenou na základě tepelného rozkladu CaCO_3 jsme provedli z důvodu malé změny tlaku při zjišťování plynatosti vzorků námi zkoušených směsí. Tím je zapříčiněn také pohyb naměřených hodnot jen v malém rozsahu kalibrační křivky vzniklé z první metody kalibrace (zátěžovou pumpou AMETEK).

Tepelný neboli termický rozklad vysušeného uhličitanu vápenatého (CaCO_3) nastává při teplotě 899°C . Rozklad se řídí dle chemické rovnice:



Uhličitan vápenatý je bílá krystalická látka, která se v přírodě vyskytuje ve formě vápence. Při provádění kalibrace je nutné určit objem uvolněných oxidů z použitého uhličitanu vápenatého. Teoreticky vypočítaný objem uvolněných plynů z naváženého vzorku CaCO_3 se vypočte dle rovnice:

$$V = \frac{V_M \cdot m}{M_{\text{CaCO}_3}}, \quad (3.2)$$

kde značí: V_M - molový objem plynu;

m - hmotnost vzorku CaCO_3 ;

M_{CaCO_3} - molární hmotnost CaCO_3 .

Objem uvolněných plynů respektive změnu tlaku uvolněných plynů při provedení měření je možné vypočítat pomocí stavové rovnice. Zkouška probíhala za stálé teploty, což znamená, že se jedná o izotermický děj, pro nějž platí Boyleův-Mariottův zákon:

$$p \cdot V = \text{konst.} \quad (3.3)$$

Za těchto podmínek lze použít rovnici:

$$\Delta V \cdot p_A = \Delta p \cdot V_0, \quad (3.4)$$

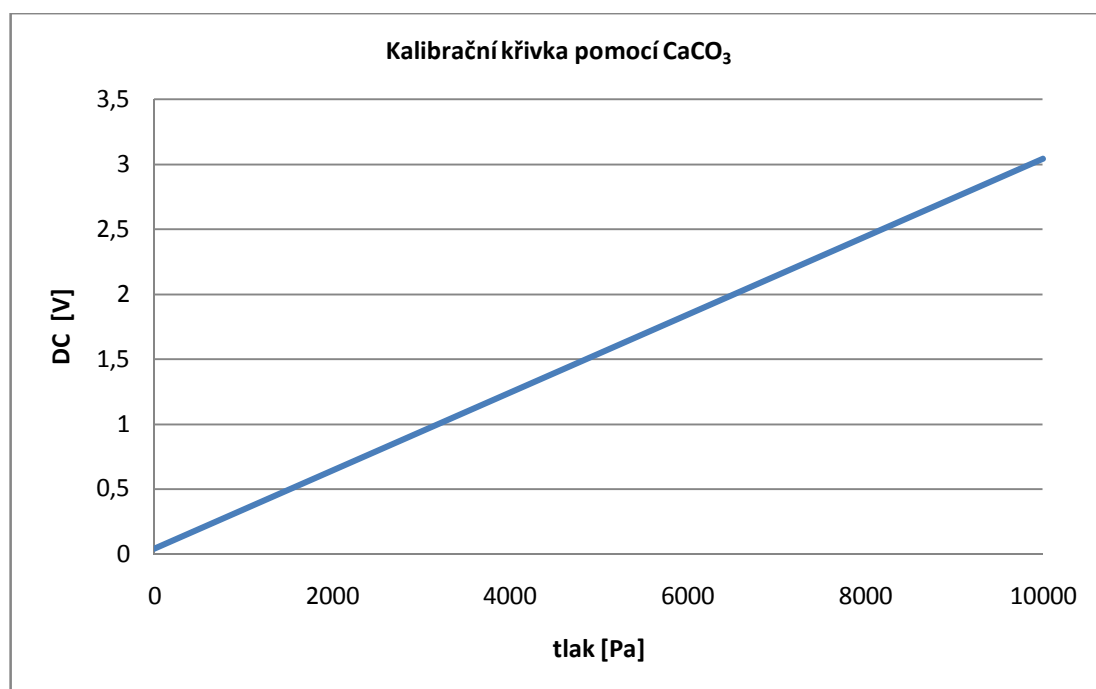
kde značí: ΔV – změnu objemu uvolněných plynů;

Δp – změna tlaku uvolněných plynů;

V_0 – objem měřicí soustavy, který je roven 1995cm³;

p_A – atmosférický tlak, který je roven 97000Pa.

Po kalibrace pomocí CaCO₃ bylo možné sestavit kalibrační křivku, která je zobrazena na obr. 3-5.



Obr. 3-5 Kalibrační křivka získaná pomocí CaCO₃.

V tabulce 3.2 jsou uvedeny zjištěné a vypočtené hodnoty kalibrace provedené tepelným rozkladem CaCO₃.

Tabulka 3.2 Kalibrační konstanty z kalibrace pomocí tepelného rozkladu CaCO_3 .

Hmotnost navážky CaCO_3 [g]	Teoretický objem uvolněných plynů [cm ³]	Vypočtený tlak uvolněných plynů [Pa]	Průměrná hodnota napětí [V]	Zjištěné přepočtové konstanty [Pa · V ⁻¹]
0,05	11,195	544,3183	0,208959	0,000382445
0,10	22,39	1088,6366	0,408576	0,000373831
0,15	33,585	1632,9549	0,556013	0,000339867
Průměrná přepočtová konstanta:				0,000365381

Při porovnání zjištěných kalibračních konstant obou provedených kalibrací jsme zjistili, že se od sebe odlišují o 16,64%. Důvodem, může být nedokonalé vysušení CaCO_3 , nepřesnost navážky a skutečnost, že využíváme teoretického výpočtu objemu, který se může od skutečného lišit.

Jakmile jsou provedeny kalibrace (nebo alespoň jedna ze dvou provedených) a zjištěny kalibrační konstanty, je možné uskutečnit měření samotné plynatosti formovacích směsí.

3.2 Popis přípravy vzorků a sledování plynatosti

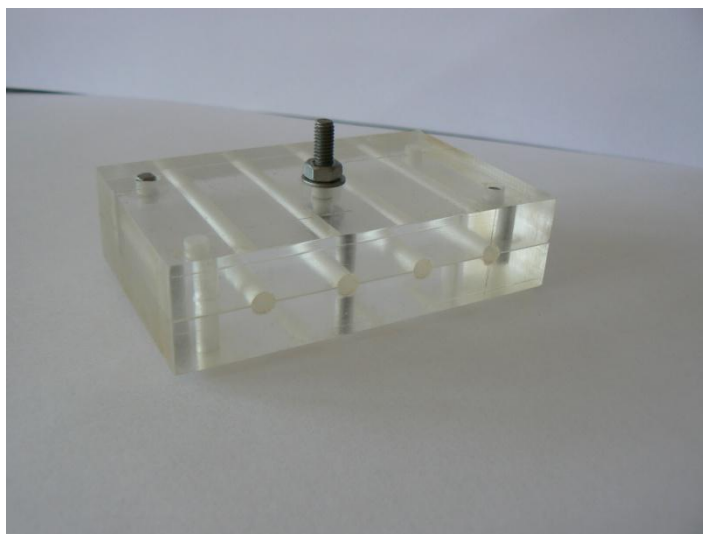
Pro provedení zkoušky jsme použili vzorky v pevném stavu ve formě válečků vytvrzených pomocí CO_2 .

Použitá formovací směs byla namíchána v dílnách naší katedry. Jako ostřívo byl použit křemenný písek ze Střelče o pěti různých hodnotách zrnitosti a jako pojivo tři hmotnostní procenta novanolu. V průběhu měření nám byly dodány další formovací směsi z jablonecké slévárny Unitherm, s.r.o. a to dorsil a ecolotec. Jejichž vzorky byly vyrobeny stejným způsobem jako vzorky z křemenného písku ze Střelče.



Obr. 3-6 Vzorky použité k měření

Vzorky byly připraveny pomocí dvoudílné formičky z polymethylmetakrylátu, která je znázorněna na obr. 3-7.



Obr. 3-7 Formička pro výrobu vzorků

Pomocí váhy LECO EB25 jsme navážili 1g formovací směsi, která byla posléze vložena do molybdenové lodičky. Jelikož vzorky vyrobené pomocí formičky nevážíly celý 1g, bylo nutné dovažovat pomocí formovací směsi v sytkém stavu.



Obr. 3-8 Váha LECO EB25

Lodička se poté i s naváženou směsí vložila do předem přehřáté pece na teplotu, při níž bude zkouška prováděna.

V tabulce 3.3 je uvedena charakteristika a vlastnosti použitého ostřiva ze Střelče a níže jsou uvedeny charakteristiky pojiv použitých ve směsích dodaných jabloneckou slévárnou Unitherm, s.r.o. a to dorsil a ecolotec.

Celkem bylo k měření použito 7 vzorků různých formovacích směsí. Každý vzorek byl postupně změřen na teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C. Každá směs byla na jednotlivých teplotách proměřena pětkrát. Celkem tedy bylo provedeno 105 úspěšných měření.

Tabulka 3.3 Přehled použitých ostřiv ze Střelče.

Označení ostřiva	Velikost středního zrna d50 [mm]	Zrnitostní rozsah [mm]	Obsah SiO ₂ [%]	Fyzikální charakteristika		
				Vlhkost [%]	Ztráta žháním [%]	Hustota [g/ml]
ST52	0,32	0,10 – 0,63	99,2	0,2	0,23	2,65
ST53	0,27	0,10 – 0,63	99,0	0,2	0,23	2,65

ST54	0,22	0,10 – 0,63	99,0	0,2	0,23	2,65
ST55	0,17	0,063 – 0,50	98,9	0,2	0,23	2,65
ST56	0,15	0,063 – 0,40	98,9	0,2	0,23	2,65

Pojivo ECOLOTEC 600

Fenolové pryskyřičné pojivo, téměř bez zápachu. Čirá tmavě červená až červenohnědá tekutina s mírným typickým zápachem fenolu neobsahující žádný dusík. Je zakázáno mísit s kyselinami nebo kyselinovými solemi, z důvodu reakce generující teplo a výpary. Využívá se jako pojivo pro výrobu jader menších rozměrů. Je speciálně vyvinut na snižování výdajů na pracovní prostor a prostředí. Nejvhodnější užití je v kombinaci s čistým nepoužitým křemenným pískem, s částečnou možností užití písku regenerovaného. Neobsahuje fosfor ani síru. Nejsou obsaženy ani peroxidy a izokyanáty. Vady odlitků způsobené přítomností těchto látek, jsou takto zcela eliminovány. Jádra vyráběná pomocí přípravku Ecolotec 600 vykazují velmi čistý povrch odlitku. Žilkování nebo jiné vady způsobené rozpínavostí křemene jsou tak největší měrou redukovány. Vytvrzování probíhá za pomoci plynu CO₂ při dávkování v poměru 2-3% plynu na množství formovacího písku. Přesné množství pojiva je závislé na geometrii jádra a kvalitě písku. Použití CO₂ v poměru k pojivu je 25-40% a závisí na geometrii jádra. Při výrobě jader pod 10kg je možné dobu cyklu ve většině případů snížit. Vytvrzování CO₂ probíhá exotermicky. Po ukončení naplynění by povrch jádra neměl být studený. Použitý alkalický písek by neměl vykazovat žádné alkalické ani kyselé nečistoty. Také je nutné vyloučit nečistoty spojené s jinými pojivovými systémy (např. křemičitan sodný), jelikož tyto mohou způsobit značné snížení pevnosti. Nejvhodnější písky jsou doporučeny s hodnotou pH v rozmezí 6,5 - 7,5.

Pojivo DORSIL V

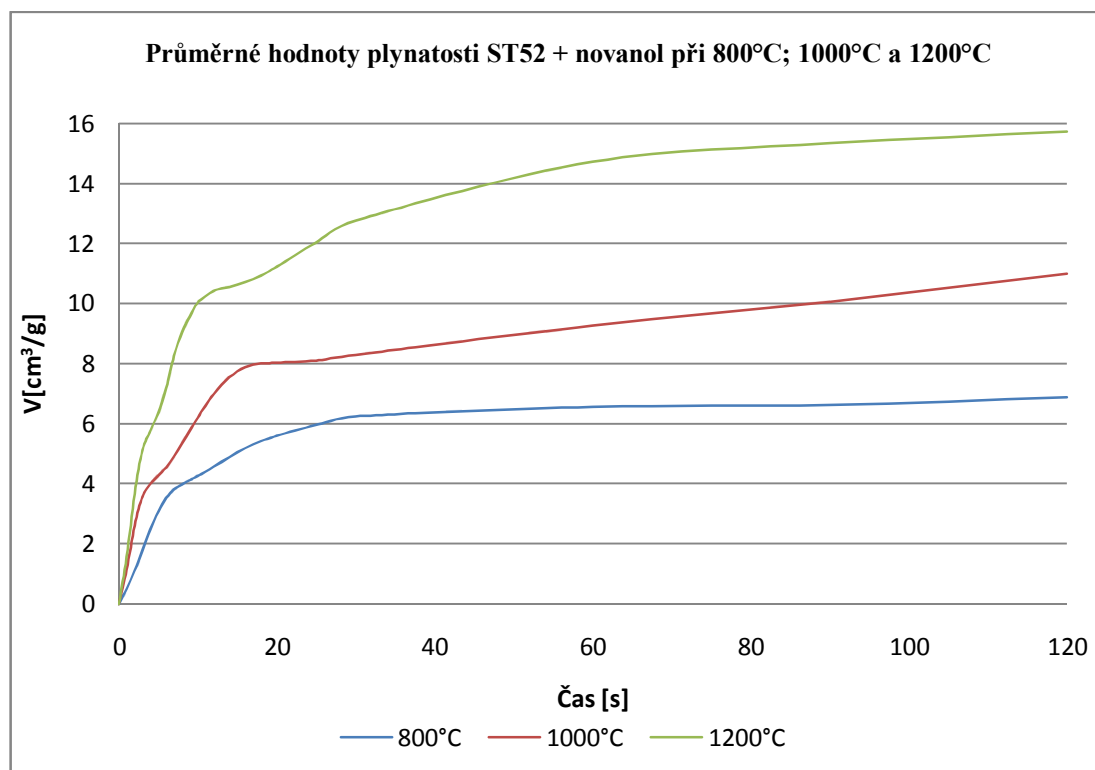
Jedná se o tekuté sodné vodní sklo. Používá se pro pojení slévarenských směsí, jejichž pH se pohybuje okolo hodnoty tří až devíti dle obsahu kyseliny. Teplota tání je na hranici tří stupňů, patří mezi nehořlavé látky bez zápachu s neomezenou rozpustností ve vodě, hustota 1328- 1557 kg/ m³. Kontakt, s touto látkou může způsobit popáleniny kůže a očí. Nejčastěji se používá jako 40% roztok, který je silně zásaditý.

3.3 Vyhodnocení záznamů získaných při měření

Jak již bylo uvedeno, všechny námi změřené směsi, byly na každé teplotě proměřeny pětkrát. Z těchto naměřených hodnot, byly vypočteny průměrné hodnoty. Získaná data byla vyhodnocena a jednotlivé směsi vzájemně porovnány z hlediska množství uvolněných plynů.

Pro lepší posuzování plynatosti jednotlivých směsí, byla jednotlivá data zpracována do grafů v závislosti objemu uvolněných plynů na čase. V této části diplomové práce jsou vyobrazeny jednotlivé grafy, k nimž jsou přiřazeny také tabulky, v kterých jsou zapsány jednotlivé hodnoty objemu uvolněných plynů v určitém čase. Z dřívějších zkušeností, při měření plynatosti, bylo zjištěno, že hodnoty plynatosti dosahují svého maxima v čase 120 s a z tohoto důvodu byly všechny závislosti sledovány v tomto časovém úseku.

Na obr. 3-9 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST52 s použitým pojivem novanolem při 800°C; 1000°C a 1200°C.



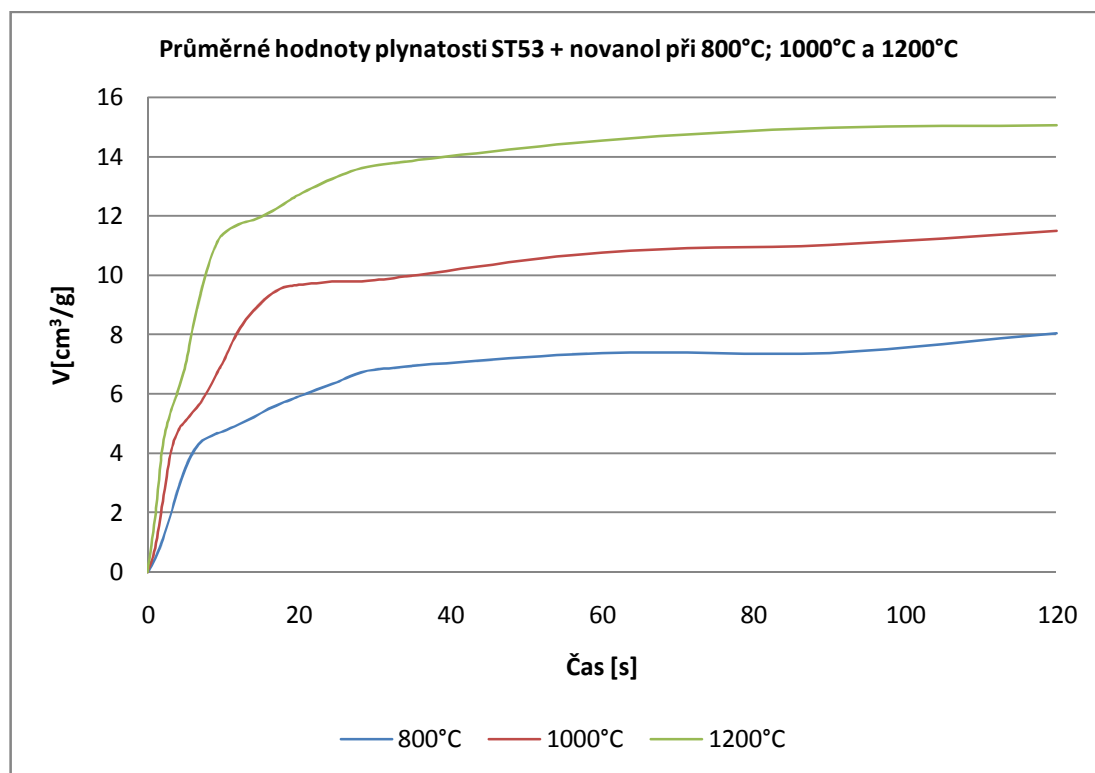
Obr. 3-9 Průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST52 + pojivo novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

V tabulce 3.4 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST52 + pojiva novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.4 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm³/g] směsi ST52 + novanol			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,510636	1,143692	1,564928
2	1,107154	2,609917	3,667896
3	1,793878	3,565022	5,120827
4	2,479642	4,001637	5,768941
5	3,082410	4,264407	6,369630
6	3,535047	4,549128	7,196076
7	3,821050	4,915404	8,259017
8	3,991049	5,334875	9,055181
9	4,128362	5,775335	9,568706
10	4,270321	6,203939	10,030959
12	4,570903	6,987442	10,418705
14	4,898243	7,539580	10,553777
16	5,193859	7,875253	10,710157
18	5,428428	7,998788	10,931107
20	5,606279	8,027786	11,228167
25	5,964703	8,096844	12,038111
30	6,252147	8,288795	12,762175
60	6,569552	9,263927	14,717574
90	6,628995	10,058006	15,329477
120	6,890006	10,989079	15,722512

Na obr. 3-10 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST53 s použitým pojivem novanolem při 800°C; 1000°C a 1200°C.



Obr. 3-10 Průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST53 + pojivo novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

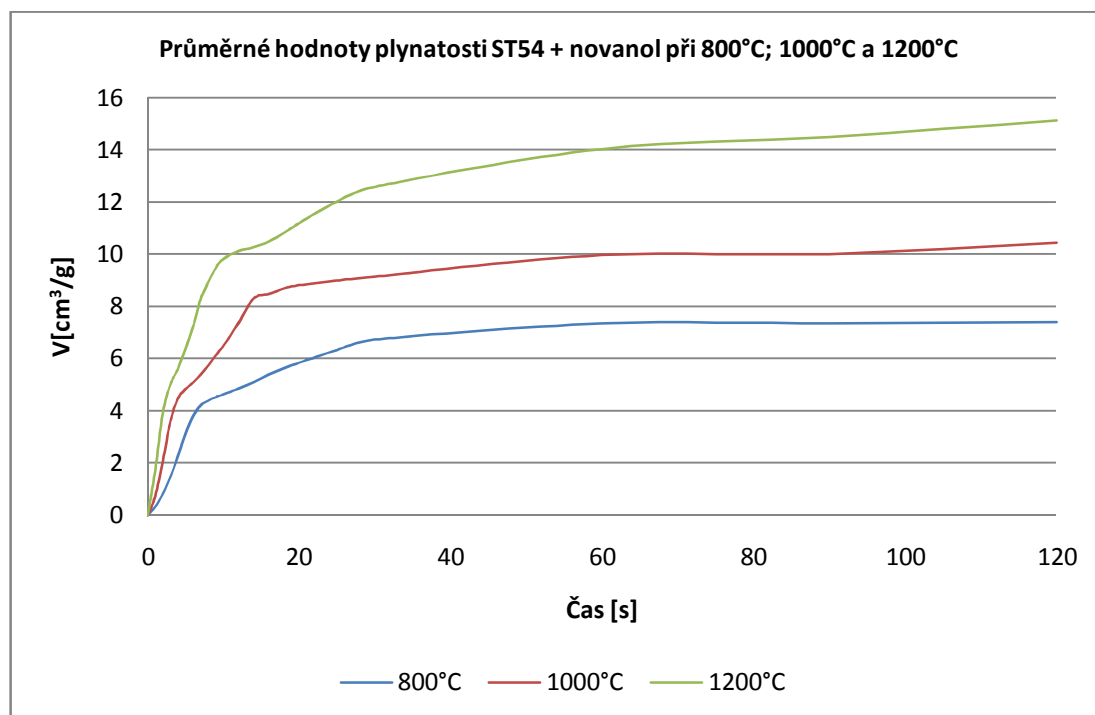
V tabulce 3.5 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST53 + pojiva novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.5 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm ³ /g] směsi ST53 + novanol			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,464973	0,816673	1,860389
2	1,113727	2,391373	4,276119
3	1,888418	3,963029	5,369021
4	2,749151	4,751661	6,099494
5	3,492438	5,104160	6,989710

6	4,044416	5,394648	8,293955
7	4,376563	5,703563	9,412013
8	4,541115	6,122931	10,342124
9	4,656157	6,626465	11,016036
10	4,746685	7,109227	11,419805
12	4,974045	8,143326	11,730163
14	5,227042	8,813551	11,886704
16	5,498463	9,306726	12,113425
18	5,726305	9,602983	12,420101
20	5,924025	9,683577	12,730616
25	6,397492	9,801342	13,332586
30	6,823530	9,839637	13,711522
60	7,377270	10,780803	14,563125
90	7,388649	11,029155	14,989808
120	8,049898	11,505987	15,066716

Na obr. 3-11 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST54 s použitým pojivem novanolem při 800°C; 1000°C a 1200°C.



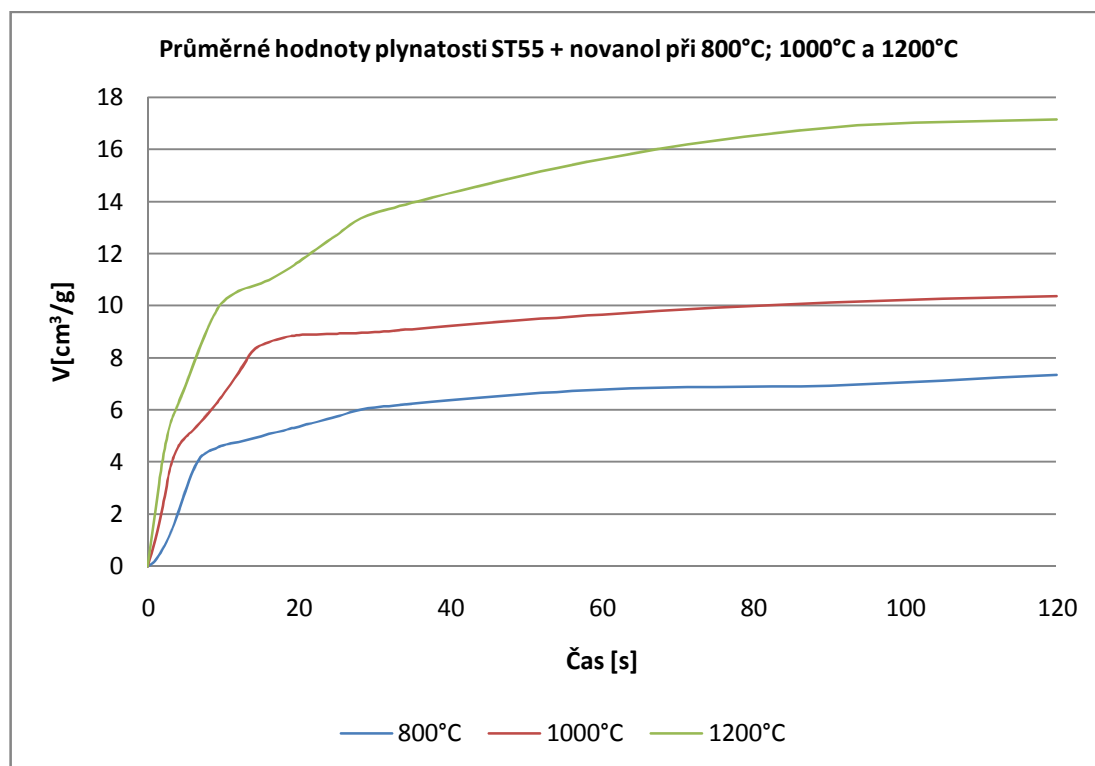
Obr. 3-11 Průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST54 + pojivo novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

V tabulce 3.6 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST53 + pojiva novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.6 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm³/g] směsi ST54 + novanol			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,317087	0,731911	1,697908
2	0,813624	2,087582	3,926322
3	1,472309	3,583931	5,009606
4	2,257574	4,472384	5,626474
5	3,114619	4,835616	6,374886
6	3,799902	5,094060	7,229369
7	4,206073	5,380063	8,290860
8	4,404112	5,738006	8,930321
9	4,525243	6,135529	9,484859
10	4,633715	6,496355	9,833992
12	4,854666	7,371829	10,131531
14	5,101894	8,311556	10,283585
16	5,391262	8,479793	10,498127
18	5,635286	8,698663	10,834440
20	5,848065	8,822357	11,201677
25	6,331785	9,001008	12,033085
30	6,729303	9,150818	12,599322
60	7,346491	9,974059	14,049843
90	7,359788	10,017322	14,509531
120	7,407057	10,450410	15,142580

Na obr. 3-12 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST55 s použitým pojivem novanolem při 800°C; 1000°C a 1200°C.



Obr. 3-12 Průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST55 + pojivo novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

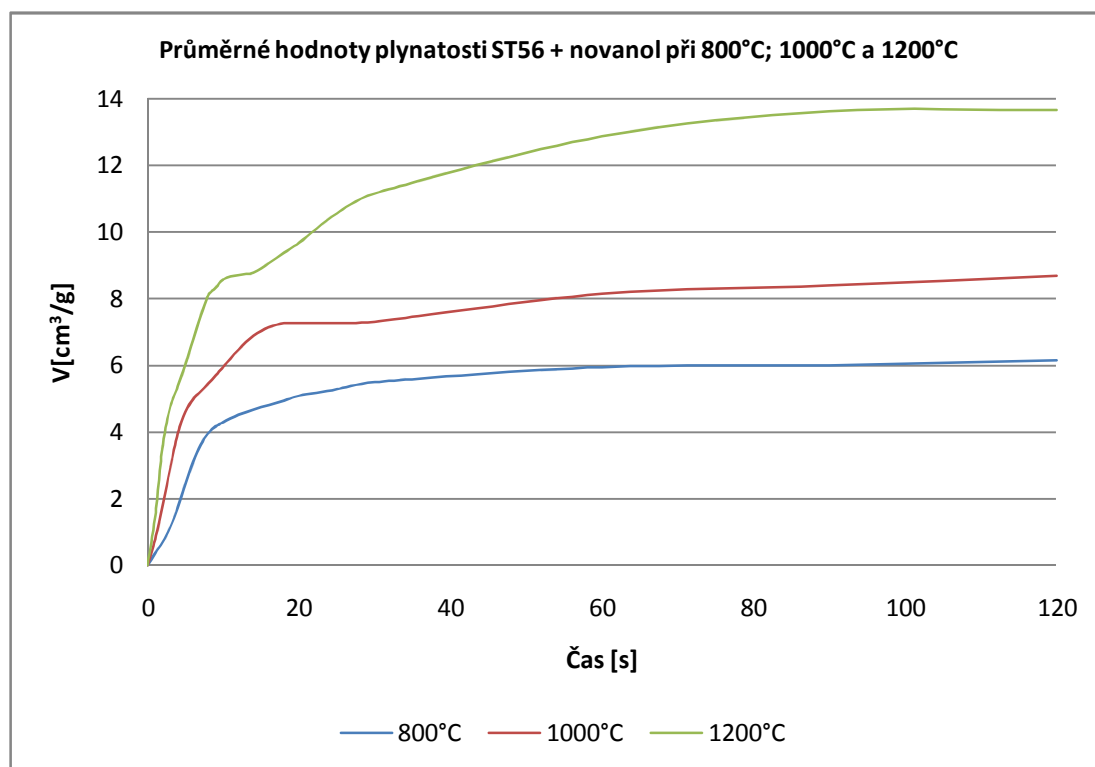
V tabulce 3.7 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST55 + pojiva novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.7 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm ³ /g] směsi ST55 + novanol			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,214542	1,014394	2,093353
2	0,653880	2,311908	4,121335
3	1,260172	3,788876	5,461786
4	2,014513	4,571742	6,209078
5	2,875723	4,958208	6,913595
6	3,676689	5,216973	7,712322

7	4,183481	5,521243	8,488296
8	4,407636	5,857238	9,166210
9	4,525401	6,215185	9,761292
10	4,646692	6,596844	10,165540
12	4,769104	7,422170	10,565945
14	4,913947	8,290595	10,760139
16	5,074493	8,597431	10,986218
18	5,213569	8,773839	11,310835
20	5,362259	8,868053	11,692495
25	5,738946	8,923652	12,712012
30	6,092886	8,981494	13,558488
60	6,786498	9,660053	15,631333
90	6,930861	10,123427	16,833347
120	7,342002	10,360725	17,145310

Na obr. 3-13 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti ostríva ST56 s použitým pojivem novanolem při 800°C; 1000°C a 1200°C.



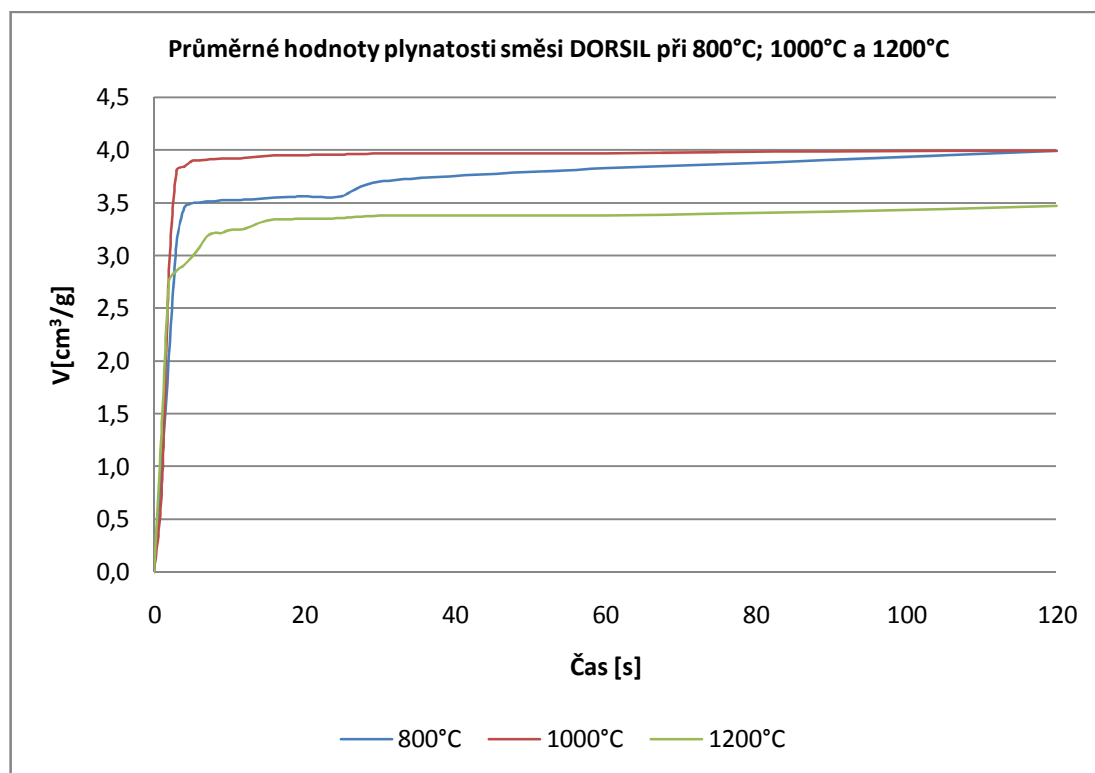
Obr. 3-13 Průměrné hodnoty plynatosti ostríva ST56 + pojivo novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

V tabulce 3.8 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti ostřiva ST56 + pojiva novanol při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.8 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm³/g] směsi ST56 + novanol			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,363713	0,776459	1,459983
2	0,689934	1,838759	3,606534
3	1,143214	2,926536	4,749909
4	1,734769	3,959355	5,375272
5	2,431913	4,608273	6,026752
6	3,098775	4,975993	6,764596
7	3,614543	5,213127	7,483690
8	3,958548	5,445777	8,094153
9	4,173892	5,698613	8,330903
10	4,293901	5,962346	8,585086
12	4,516135	6,473627	8,716151
14	4,677163	6,896788	8,784888
16	4,810471	7,149462	9,063720
18	4,944579	7,264344	9,382713
20	5,088142	7,268991	9,681675
25	5,284899	7,276521	10,565804
30	5,497038	7,316260	11,160564
60	5,953363	8,145752	12,875626
90	6,006877	8,402752	13,632536
120	6,156689	8,693404	13,669388

Na obr. 3-14 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti směsi DORSIL při 800°C; 1000°C a 1200°C.



Obr. 3-14 Průměrné hodnoty plynatosti směsi DORSIL při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

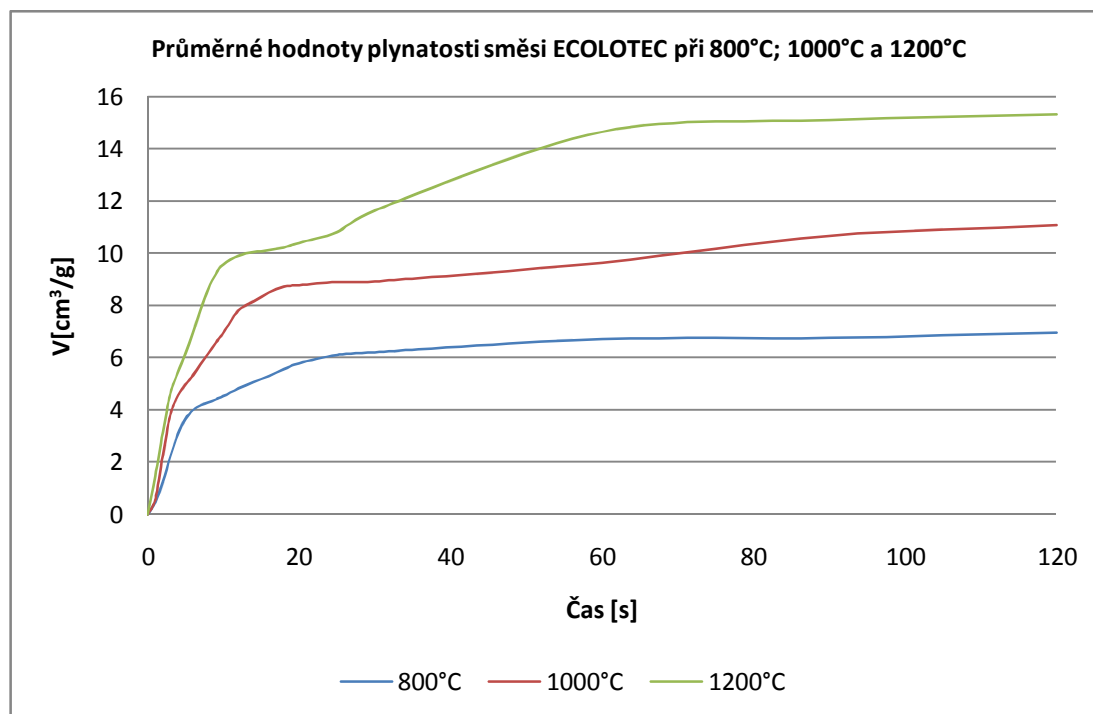
V tabulce 3.9 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi DORSIL při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.9 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm³/g] směsi DORSIL			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	1,019034	0,731111	1,323634
2	2,048002	2,859074	2,755740
3	3,104366	3,805688	2,857324
4	3,451894	3,843500	2,910840
5	3,496277	3,897335	2,984865
6	3,503487	3,905669	3,075873

7	3,514621	3,911597	3,180822
8	3,518527	3,918647	3,215427
9	3,524952	3,920410	3,215428
10	3,529364	3,921531	3,243791
12	3,531924	3,927460	3,253722
14	3,540386	3,942681	3,311887
16	3,549273	3,954216	3,344572
18	3,558429	3,954377	3,345853
20	3,562957	3,954698	3,353065
25	3,564853	3,960306	3,357069
30	3,704408	3,968157	3,380462
60	3,829064	3,971681	3,382546
90	3,907415	3,991230	3,419718
120	3,995378	3,994435	3,473392

Na obr. 3-15 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti směsi ECOLOTEC při 800°C; 1000°C a 1200°C.



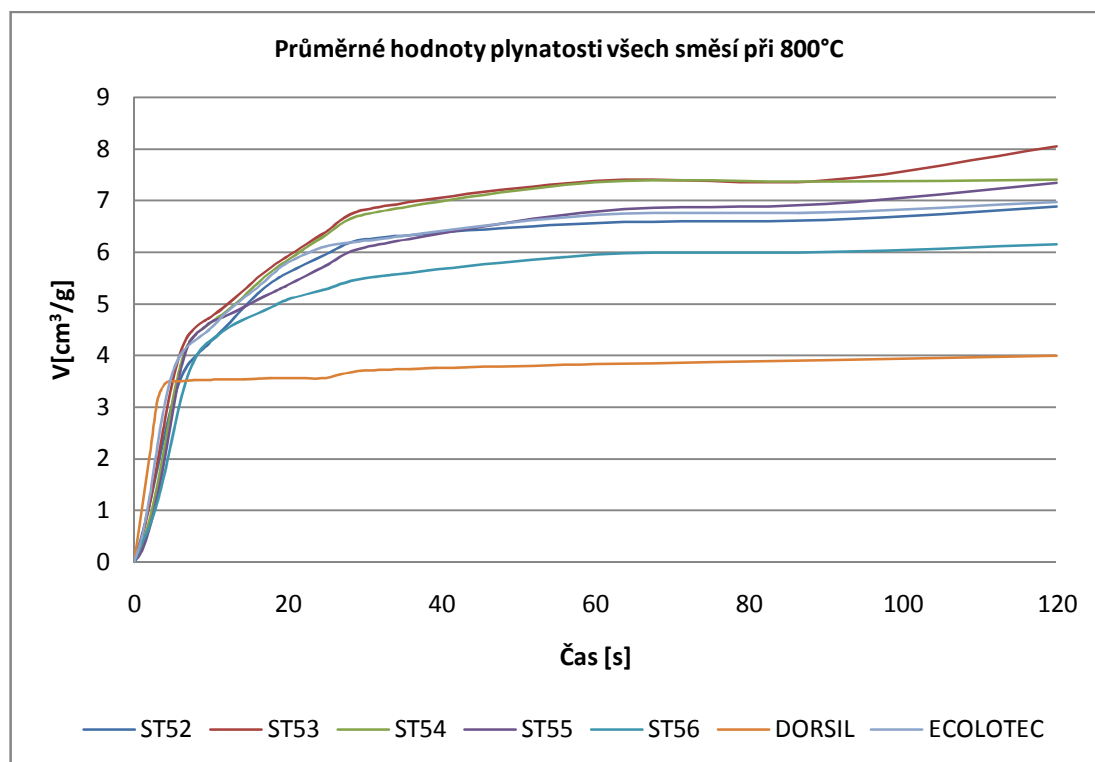
Obr. 3-15 Průměrné hodnoty plynatosti směsi ECOLOTEC při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C.

V tabulce 3.10 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti směsi ECOLOTEC při teplotách 800°C; 1000°C a 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.10 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm³/g] směsi ECOLOTEC			
Čas [s]	Teploty [°C]		
	800	1000	1200
0	0	0	0
1	0,474908	0,557584	1,452618
2	1,258571	2,270397	3,144775
3	2,224571	3,810647	4,633121
4	3,070562	4,549289	5,437460
5	3,663558	4,983661	6,157358
6	4,001473	5,334395	6,978200
7	4,179484	5,746336	7,867139
8	4,298372	6,150746	8,648886
9	4,406524	6,563006	9,214967
10	4,532301	6,954279	9,595826
12	4,826957	7,799469	9,917240
14	5,076910	8,164784	10,059041
16	5,305872	8,486515	10,127296
18	5,570726	8,722048	10,236252
20	5,798887	8,778287	10,416505
25	6,115974	8,897175	10,819317
30	6,220119	8,918645	11,655222
60	6,719221	9,641422	14,665240
90	6,766967	10,668150	15,120440
120	6,969335	11,075123	15,339313

Na obr. 3-16 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 800°C.



Obr. 3-16 Průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 800°C.

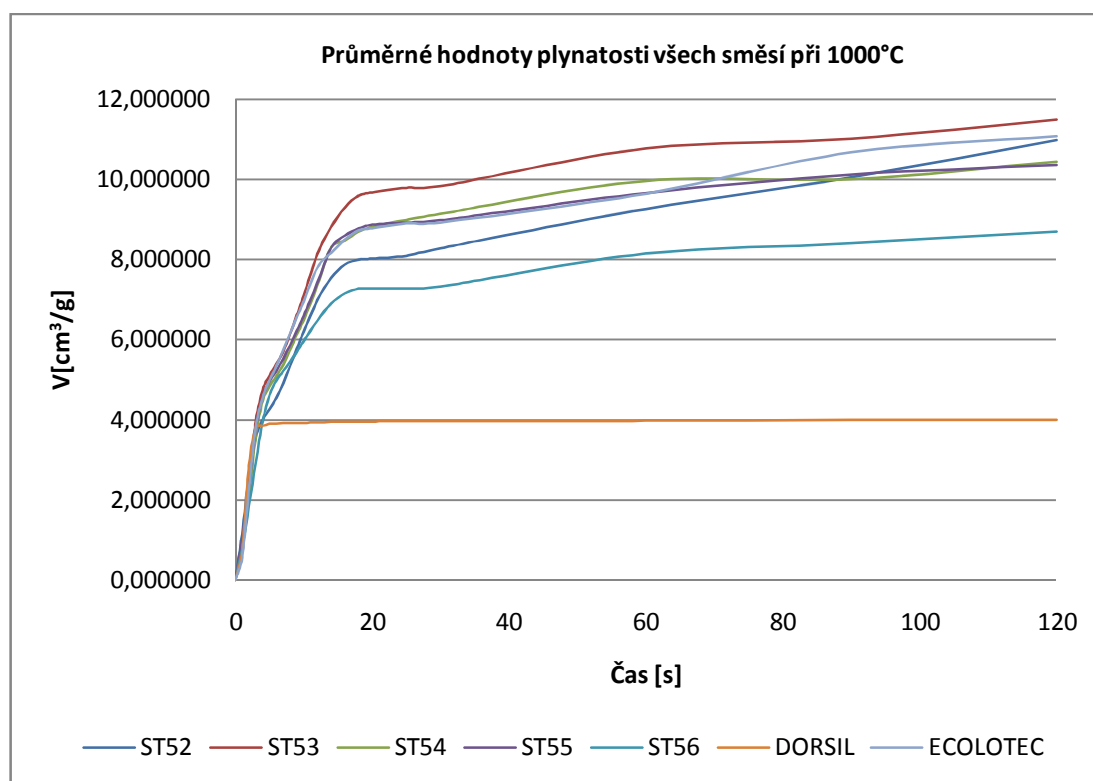
V tabulce 3.11 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 800°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.11 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm ³ /g] směsí při 800°C							
Čas [s]	Označení směsi						
	ST52	ST53	ST54	ST55	ST56	dorsil	ecolotec
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,510636	0,464973	0,317087	0,214542	0,363713	1,019034	0,474908
2	1,107154	1,113727	0,813624	0,653880	0,689934	2,048002	1,258571
3	1,793878	1,888418	1,472309	1,260172	1,143214	3,104366	2,224571
4	2,479642	2,749151	2,257574	2,014513	1,734769	3,451894	3,070562
5	3,082410	3,492438	3,114619	2,875723	2,431913	3,496277	3,663558
6	3,535047	4,044416	3,799902	3,676689	3,098775	3,503487	4,001473
7	3,821050	4,376563	4,206073	4,183481	3,614543	3,514621	4,179484

8	3,991049	4,541115	4,404112	4,407636	3,958548	3,518527	4,298372
9	4,128362	4,656157	4,525243	4,525401	4,173892	3,524952	4,406524
10	4,270321	4,746685	4,633715	4,646692	4,293901	3,529364	4,532301
12	4,570903	4,974045	4,854666	4,769104	4,516135	3,531924	4,826957
14	4,898243	5,227042	5,101894	4,913947	4,677163	3,540386	5,076910
16	5,193859	5,498463	5,391262	5,074493	4,810471	3,549273	5,305872
18	5,428428	5,726305	5,635286	5,213569	4,944579	3,558429	5,570726
20	5,606279	5,924025	5,848065	5,362259	5,088142	3,562957	5,798887
25	5,964703	6,397492	6,331785	5,738946	5,284899	3,564853	6,115974
30	6,252147	6,823530	6,729303	6,092886	5,497038	3,704408	6,220119
60	6,569552	7,377270	7,346491	6,786498	5,953363	3,829064	6,719221
90	6,628995	7,388649	7,359788	6,930861	6,006877	3,907415	6,766967
120	6,890006	8,049898	7,407057	7,342002	6,156689	3,995378	6,969335

Na obr. 3-17 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 1000°C.



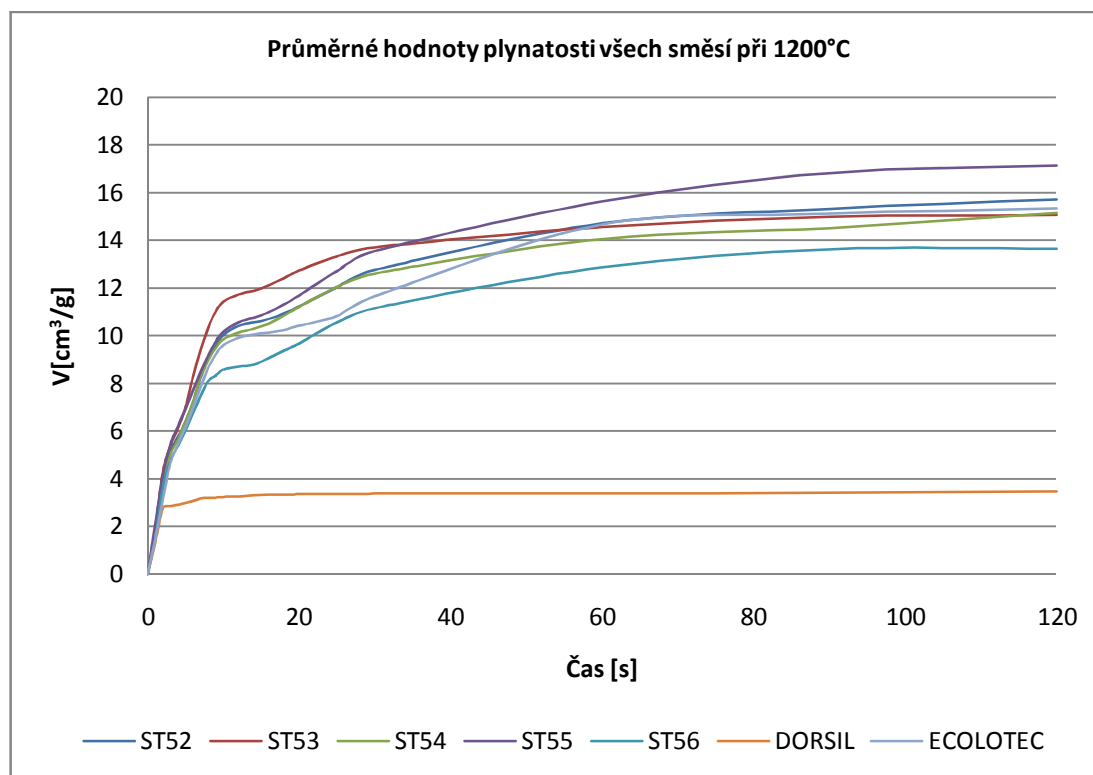
Obr. 3.17 Průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 1000°C.

V tabulce 3.12 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 1000°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.12 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm³/g] směsí při 1000°C							
Čas [s]	Označení směsi						
	ST52	ST53	ST54	ST55	ST56	dorsil	ecolotec
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,143692	0,816673	0,731911	1,014394	0,776459	0,731111	0,557584
2	2,609917	2,391373	2,087582	2,311908	1,838759	2,859074	2,270397
3	3,565022	3,963029	3,583931	3,788876	2,926536	3,805688	3,810647
4	4,001637	4,751661	4,472384	4,571742	3,959355	3,843500	4,549289
5	4,264407	5,104160	4,835616	4,958208	4,608273	3,897335	4,983661
6	4,549128	5,394648	5,094060	5,216973	4,975993	3,905669	5,334395
7	4,915404	5,703563	5,380063	5,521243	5,213127	3,911597	5,746336
8	5,334875	6,122931	5,738006	5,857238	5,445777	3,918647	6,150746
9	5,775335	6,626465	6,135529	6,215185	5,698613	3,920410	6,563006
10	6,203939	7,109227	6,496355	6,596844	5,962346	3,921531	6,954279
12	6,987442	8,143326	7,371829	7,422170	6,473627	3,927460	7,799469
14	7,539580	8,813551	8,311556	8,290595	6,896788	3,942681	8,164784
16	7,875253	9,306726	8,479793	8,597431	7,149462	3,954216	8,486515
18	7,998788	9,602983	8,698663	8,773839	7,264344	3,954377	8,722048
20	8,027786	9,683577	8,822357	8,868053	7,268991	3,954698	8,778287
25	8,096844	9,801342	9,001008	8,923652	7,276521	3,960306	8,897175
30	8,288795	9,839637	9,150818	8,981494	7,316260	3,968157	8,918645
60	9,263927	10,780803	9,974059	9,660053	8,145752	3,971681	9,641422
90	10,058006	11,029155	10,017322	10,123427	8,402752	3,991230	10,668150
120	10,989079	11,505987	10,450410	10,360725	8,693404	3,994435	11,075123

Na obr. 3-18 jsou zobrazeny průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 1200°C.



Obr. 3-18 Průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 1200°C.

V tabulce 3.13 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti všech použitých směsí při 1200°C, při určitých časových okamžicích.

Tabulka 3.13 Průměrné hodnoty objemů uvolněných plynů v určitých časových okamžicích.

Hodnoty plynatosti [cm ³ /g] směsí při 1200°C							
Čas	Označení směsi						
[s]	ST52	ST53	ST54	ST55	ST56	dorsil	ecolotec
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,564928	1,860389	1,697908	2,093353	1,459983	1,323634	1,452618
2	3,667896	4,276119	3,926322	4,121335	3,606534	2,755740	3,144775
3	5,120827	5,369021	5,009606	5,461786	4,749909	2,857324	4,633121
4	5,768941	6,099494	5,626474	6,209078	5,375272	2,910840	5,437460
5	6,369630	6,989710	6,374886	6,913595	6,026752	2,984865	6,157358
6	7,196076	8,293955	7,229369	7,712322	6,764596	3,075873	6,978200

7	8,259017	9,412013	8,290860	8,488296	7,483690	3,180822	7,867139
8	9,055181	10,342124	8,930321	9,166210	8,094153	3,215427	8,648886
9	9,568706	11,016036	9,484859	9,761292	8,330903	3,215428	9,214967
10	10,030959	11,419805	9,833992	10,165540	8,585086	3,243791	9,595826
12	10,418705	11,730163	10,131531	10,565945	8,716151	3,253722	9,917240
14	10,553777	11,886704	10,283585	10,760139	8,784888	3,311887	10,059041
16	10,710157	12,113425	10,498127	10,986218	9,063720	3,344572	10,127296
18	10,931107	12,420101	10,834440	11,310835	9,382713	3,345853	10,236252
20	11,228167	12,730616	11,201677	11,692495	9,681675	3,353065	10,416505
25	12,038111	13,332586	12,033085	12,712012	10,565804	3,357069	10,819317
30	12,762175	13,711522	12,599322	13,558488	11,160564	3,380462	11,655222
60	14,717574	14,563125	14,049843	15,631333	12,875626	3,382546	14,665240
90	15,329477	14,989808	14,509531	16,833347	13,632536	3,419718	15,120440
120	15,722512	15,066716	15,142580	17,145310	13,669388	3,473392	15,339313

4. Diskuze výsledků

Tato diplomová práce a výsledky v ní obsažené, přinášejí informace o plynatosti u různých formovacích směsí a způsobu jejího měření. Hodnoty plynatosti, které jsou zde uvedeny, přinášejí usnadnění pro rozhodnutí nasazení měřených formovacích směsí v praxi. Tím také minimalizovat vznik vad na povrchu eventuelně uvnitř formy a tím zvýšit také kvalitu výroby.

Sledování plynatosti je poměrně složitá záležitost, jelikož pískové formy mají velmi pórovitou strukturu a skládají se z několika složek, přičemž, každá z nich má větší či menší schopnost uvolňovat plyny.

Tyto složky zapříčiňují, že při zvyšování teploty nastává vypařování volné vody a jiných kapalných látek, tepelné roztažnosti vzduchu v dutině formy, spalování organických látek a uhlíkových přísad, tepelný rozklad minerálů a uhličitánů.

Hlavní složkou, která, má velký vliv na plynatost jsou pojiva. Největší plynatost vykazují organická pojiva (pryskyřice) a nejmenší plynatost mají pojiva na bázi vodního skla. Nevýhodou pojiv na bázi vodního skla je příliš velká zbytková pevnost.

Z grafů vzniklých z měření je patrné, že největší vývin plynů je na samotném počátku měření, poté vývin plynů narůstá jen pozvolna a ke konci limituje k maximální hodnotě plynatosti. Vzájemným porovnáním jednotlivých směsí je možné říci, která ze zkoušených směsí má největší a která nejmenší plynatost.

Do dnešní doby však nebyla vyvinuta metoda, která by do zkoušek plynatosti zahrnula vedle použitého materiálu formovací směsi také tvar dutiny slévárenské formy.

Velký rozvoj zaznamenal vývoj přístrojů sloužících k měření plynatosti nepřímou metodou. Základem je zahřívání malého vzorku formovací směsi v elektrické odporové peci. Na stejném principu pracuje i měřicí zařízení na pracovišti KSP TU v Liberci. Toto zařízení zaznamenává vedle maximální hodnoty plynatosti i celý průběh celé zkoušky.

Měřicí čidlo našeho měřicího zařízení musí být kalibrováno pro jeho správnou funkčnost. Kalibrace je prováděna dvěma způsoby a to tepelným rozkladem CaCO_3 a pomocí zátěžové pumpy AMETEK.

Při vyhodnocování plynatosti jednotlivých směsí jsem došel k závěru, že nejnižší hodnotu plynatosti má směs používající jako pojivo dorsil, které je na bázi vodního skla. Jeho plynatost činila v čase 120 s při 800°C 3,995 cm³·g⁻¹; při 1000°C 3,994 cm³·g⁻¹ a při 1200°C 3,473 cm³·g⁻¹. Tyto hodnoty jsou trochu překvapivé, neboť lze očekávat, že nejnižší plynatost bude vykazovat experiment s nejnižší teplotou ohřevu a nejvyšší plynatost by měla být naměřena při nejvyšší teplotě ohřevu. Nenaměřené hodnoty plynatosti podle očekávání, lze vysvětlit tím, že v tomto období začalo docházet ke vzniku drobné trhlinky na křemenné trubici, která je důležitým prvkem měřicí soustavy. Tato vada byla zjištěna až po provedeném měření.

V této souvislosti by v příštím období bylo vhodné, po opravě zařízení, tyto experimenty zopakovat.

Vedle toho nejnižší hodnoty plynatosti vykazují směsi používající pojivo novanol a ecolotec, která jsou na bázi pryskyřičných pojiv. Jejich plynatost činila v čase 120 s při 800°C ST52 6,890 cm³·g⁻¹; ST53 8,049 cm³·g⁻¹; ST54 7,407 cm³·g⁻¹; ST55 7,342 cm³·g⁻¹; ST56 6,157 cm³·g⁻¹ a ecolotec 6,969 cm³·g⁻¹; při 1000°C ST52 10,989 cm³·g⁻¹; ST53 11,506 cm³·g⁻¹; ST54 10,450 cm³·g⁻¹; ST55 10,361 cm³·g⁻¹; ST56 8,693 cm³·g⁻¹; ecolotec 11,075 cm³·g⁻¹ a při 1200°C ST52 15,723 cm³·g⁻¹; ST53 15,067 cm³·g⁻¹; ST54 15,143 cm³·g⁻¹; ST55 17,145 cm³·g⁻¹; ST56 13,669 cm³·g⁻¹; ecolotec 15,339 cm³·g⁻¹.

Poté co jsem se seznámil s měřícím zařízením na KSP TU v Liberci a se způsobem měření a vyhodnocování výsledků, rád bych navrhl a doporučil určité konstrukční úpravy. Jednou z úprav by bylo vyřešení otázky zakládání vzorku do prostoru pece. Jelikož ruční vsouvání vzorku může ovlivnit výsledné hodnoty a to tím, že není v lidských silách zatlačit a utěsnit vzorek vždy stejně velkou silou. Při vyhodnocování výsledků je nutné toto kolísání v zaznamenaných datech odečíst. Proto, by bylo na zvážení využití nějakého automatického nebo alespoň poloautomatického robota, který by byl schopen vložit vzorek do prostoru pece stejnou rychlostí, silou a automaticky spustit také záznam měření. Další úpravou by bylo zajištění místnosti, v které probíhá měření proti nepříznivému kolísání tlaku v místnosti. Nejvhodnějším způsobem by bylo provádět měření v místnosti o stálém tlaku. Je nutné říci, že pro potřeby experimentálního měření na našem zařízení jsou prostory, v kterých je měřicí soustava umístěna dostačující.

5. Závěr

Diplomová práce se zabývá tématem „Posouzení plynatosti vybraných formovacích a jádrových směsí.“ Tato práce je rozdělena do dvou hlavních částí a to část rešeršní (teoretickou) a část experimentální.

V první, rešeršní části práce je provedeno seznámení s jednotlivými částmi formovacích směsí, jejich vlastnosti a vliv na plynatost formovací směsi.

Druhá hlavní část této práce, je zaměřena na sledování plynatosti jednotlivých formovacích směsí a vyhodnocení zaznamenaných dat.

Veškeré výsledky a poznatky lze shrnout do těchto bodů:

- 1) Zařízení, které bylo zkonstruováno na naší katedře a bylo na něm prováděno měření, funguje bez sebemenších problémů. Získaná data byla dále vyhodnocena pomocí vytvořeného programu dle již otestovaného postupu. Z dřívějších experimentů bylo zjištěno, že maximální hodnoty plynatosti se dosahuje ve 120s a poté zůstává takřka konstantní.
- 2) Z výsledků se potvrdila skutečnost, že anorganické látky vykazují nižší hodnoty plynatosti než látky organické.
- 3) Nejnižší hodnoty plynatosti dosahuje směs s použitým pojivem dorsil, a to při všech měřených třech měřených teplotách (800°C $3,995\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$; 1000°C $3,994\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$; 1200°C $3,473\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$).
- 4) Nejvyšší hodnoty plynatosti dosahuje směs s použitým pojivem novanol a ostřivem ze Střelče ST53 při 800°C $8,049\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$.
- 5) Nejvyšší hodnoty plynatosti dosahuje směs s použitým pojivem novanol a ostřivem ze Střelče ST53 při 1000°C $11,506\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$.
- 6) Nejvyšší hodnoty plynatosti dosahuje směs s použitým pojivem novanol a ostřivem ze Střelče ST55 při 1200°C $17,145\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$.

Jelikož se jednalo o základní výzkum a zjištěné hodnoty a výsledky nebyly použity v praxi, tak se z tohoto důvodu nedělá žádný ekonomický přínos této práce.

6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JELÍNEK, P.: Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí-ostřiva, Ostrava 2000.
- [2] JENČOVSKÝ, M.: Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi. [Bakalářská práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2006.
- [3] RUSÍN, K.: Disperzní formovací materiály. [Skripta]. Praha 1985.
- [4] MACHUTA, J.: Posuzování plynatosti vybraných slévárenských směsí. [Diplomová práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2007.
- [5] SEIDL, M.: Zařízení na měření plynatosti jádrových a formovacích směsí. In.: Moderní formovací materiály, 19. – 20. 4. 2006 Milovy, str. 199. – 203.
- [6] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsi – III.část, Vysoká škola Báňská v Ostravě, Ostrava 1984.

PŘÍLOHY

Výpočty provedené při chemické kalibraci

- **Výpočet uvolněných objemu plynů**

$$m_1 = 0,05g$$

$$m_2 = 0,10g$$

$$m_3 = 0,15g$$

$$V_m = 22,41 \text{ dm}^3/\text{mol}$$

$$M_{CaCO_3} = 100,088 \text{ g/mol}$$

$$\Delta V_1 = \frac{(V_m \cdot m_1)}{M_{CaCO_3}} = \frac{(22,41 \cdot 0,05)}{100,088} = \frac{1,1205}{100,088} = 0,011195 \text{ dm}^3 \cong 11,195 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V_2 = \frac{(V_m \cdot m_2)}{M_{CaCO_3}} = \frac{(22,41 \cdot 0,1)}{100,088} = \frac{2,241}{100,088} = 0,02239 \text{ dm}^3 \cong 22,39 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V_3 = \frac{(V_m \cdot m_3)}{M_{CaCO_3}} = \frac{(22,41 \cdot 0,15)}{100,088} = \frac{3,3615}{100,088} = 0,033585 \text{ dm}^3 \cong 33,585 \text{ cm}^3$$

- **Výpočet změny tlaku**

$$\Delta V_1 = 11,195 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V_2 = 22,39 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V_3 = 33,585 \text{ cm}^3$$

$$p_A = 97000 \text{ Pa}$$

$$V_0 = 1995 \text{ cm}^3$$

$$\Delta p_1 = \frac{\Delta V_1 \cdot p_A}{V_0} = \frac{11,195 \cdot 97000}{1995} = \frac{1085915}{1995} \cong 544,3183 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_2 = \frac{\Delta V_2 \cdot p_A}{V_0} = \frac{22,39 \cdot 97000}{1995} = \frac{2171830}{1995} \cong 1088,6366 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_3 = \frac{\Delta V_3 \cdot p_A}{V_0} = \frac{33,585 \cdot 97000}{1995} = \frac{3257745}{1995} \cong 1632,9549 \text{ Pa}$$

Popis součástí měřícího zařízení

Tlakové čidlo měřící soustavy



Tlakové čidlo PXM02MC0-160mBARG5T slouží k snímání tlaku uvolňujících se plynů. Čidlo pracuje v rozsahu 0 – 160 mbar a je napájeno 24 – 32 Vdc zdrojem. Toto čidlo je možné připojit k jakémukoliv PC pomocí sběrnice dat.

Sběrnice dat

Jedná se o vícefunkční modul sloužící pro sběr dat spojený s PC pomocí universální sériové linky. Využívá 22-bitového konektoru pro vysoké rozlišení. K systému lze pro přímé měření připojit napěťové, frekvenční, pulzní, termočláňkové a digitální vstupy. Jednoduchým připojením k PC pomocí kabelu je zajištěn jak rychlý přenos

dat, tak i napájení jednotlivých modulů. Z důvodu přísných výkonových omezení univerzální sériové linky je napájení jednotlivých modulů zajišťováno pomocí speciálních řídicích obvodů tak, aby vyhovělo daným požadavkům. Univerzální sériová linka (USB) je novým standardem pro spojení osobních počítačů s periferními zařízeními. Systém OMB-DAQ-56 překonal různá omezení zejména PCMCIA karet a rovněž nabízí výhody systémů pro sběr dat připojitelných k PC. Systém OMB-DAQ-56 má 20 jednoduchých nebo 10 jednoduchých diferenčních analogových nebo termočlánekových vstupů, 8 digitálních V/V kanálů a 2 frekvenční kanály.



Data ze sběrnice OMB-DAQ-56 zpracovává program DaqView. Aby měření probíhalo správně, je nutné nastavit správný kanál, z kterého sběrnice data vysílá. Nutné je také správně nastavit meze, interval měřených hodnot a časový interval měření. V mém případě probíhalo snímání dvakrát za sekundu. Program ukládá hodnoty napětí ve zvolených časových úsecích a ukládá je do textového souboru. Během probíhajícího měření je možné na displeji sledovat celý průběh na grafu.

Další informace o čidle a sběrnici dat naleznete na www.omegadyne.com.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu užití, jsem si vědom, že povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovanou úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucí diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 23. května 2008

.....
David KOČÍ
Gagarinova 772
460 07 Liberec

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec, 23. May 2008

.....
David KOČÍ
Gagarinova 772
460 07 Liberec